

Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern

Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern

Die vorliegende Broschüre wurde geschaffen als Unterlage für Aktivitäten im Rahmen des Impuls-Programms PACER des Bundesamts für Konjunkturfragen, welches die Förderung erneuerbarer Energien zum Ziel hat.

Bei der anaeroben Vergärung oder Methanisierung werden organische Reststoffe in den erneuerbaren Energieträger Biogas und in organischen Dünger umgewandelt. Sowohl zur Vergärung fester als auch flüssiger Substrate sind in jüngster Zeit neue Verfahren entwickelt worden, welche für die Abfallbewirtschaftung – die sich im Zusammenhang mit der getrennten Einsammlung organischer Abfälle in einem Umbruch befindet – ganz neue Perspektiven eröffnen.

Neben Informationen zu den Grundlagen der Vergärung wird eine Übersicht über die neuesten Verfahren gegeben. Durch einen technischen und ökonomischen Vergleich der Vergärung mit aeroben Verfahren (Kompostierung, Abwasserbelüftung) können die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten anaerober Verfahren abgegrenzt und das Potential an erneuerbarer Energie in Form von Biogas bestimmt werden. Anhand bereits realisierter Praxisbeispiele werden betriebliche Konsequenzen, Kosten und Energiebilanzen vorgestellt. Die Broschüre richtet sich an Vertreter von Gemeinden und Industrien, welche sich mit der Verwertung biogener Abfälle und Abwässer beschäftigen, an Ingenieur- und Planungsbüros sowie an interessierte öffentliche Stellen. Ziel ist, den LeserInnen einen Überblick über die Aufbereitung biogener Reststoffe zu geben, welcher eine optimale Entscheidungsfindung für zukünftige Projekte erlaubt.

ISBN 3-905232-19-7

1993

Bestellung Nr. 724.230 d

**IMPULSPROGRAMM
ERNEUERBARE ENERGIEN**

Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern

**Neue Technologien
zur umweltgerechten Aufbereitung
organischer Reststoffe**



Bundesamt für Konjunkturfragen

Trägerorganisationen

- VSA Verband Schweizerischer
Abwasserfachleute
ANS Verband zur Verwertung organischer
Abfälle
SIA Schweizerischer Ingenieur- und
Architekten-Verein
STV Schweizerischer Technischer Verband

Autoren

An der Verfassung dieses Buchs haben mitgewirkt:

Werner Edelmann
Hans Engeli
Michel Glauser
Helmut Hofer
Yves Membrez
Jacques-H. Meylan
Jean-Paul Schwitzguébel

Übersetzungen aus dem Französischen und
verantwortlich für die deutsche Endredaktion:

Werner Edelmann

Layout

Consortium DAC/City Comp
Lausxanne et Morges

ISBN 3-905232-19-7

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, Januar 93
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe
erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen-
und Materialzentrale, Bern (Best. Nr. 724.230 d)

Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf sechs Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- IP BAU – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringen Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitenkapital.

Im Zentrum der Aktivität von PACER steht die Förderung verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien. Bis heute ist der Beitrag der erneuerbaren Energien mit Ausnahme der Wasserkraft trotz des beträchtlichen Potentials sehr gering geblieben. Das Programm PACER soll deshalb

- die Anwendungen mit dem besten Kosten-/Nutzenverhältnis fördern,
- den Ingenieuren, Architekten und Installateuren die nötigen Kenntnisse vermitteln,
- eine andere ökonomische Betrachtungsweise einführen, welche die externen Kosten (Umweltbelastung usw.) mit einbezieht, sowie
- Behörden und Bauherren informieren und ausbilden.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos, etc.

Umgesetzt werden sollen die Ziele von PACER durch Aus- und Weiterbildung sowie Information. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Zielpublikum sind vor allem Ingenieure, Architekten, Installateure sowie Angehörige bestimmter spezialisierter Berufszweige aus dem Bereich der erneuerbaren Energien.

Die Verbreitung allgemeiner Information ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des Programmes. Sie soll Anreize geben bei Bauherren, Architekten, Ingenieuren und Behördenmitgliedern.

InteressentInnen können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint zwei- bis dreimal jährlich und ist (im Abonnement, auch in französisch und italienisch) beim Bundesamt für Konjunkturfragen 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem/r Kurs- oder VeranstaltungsteilnehmerIn wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Diese Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen direkt bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch SpezialistInnen auch die Beachtung der Schnittstellen sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus VertreterInnen der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programms fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten zur Förderung der erneuerbaren Energien sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Jean-Bernard Gay, Dr. Charles Filleux, Jean Graf, Gaby Roost, Dr. Arthur Wellinger, Irene Wuillemin, BfK) begleitet durch Eric Mosimann, BfK, verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Arbeitsgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben zu lösen haben.

Hinweise zur vorliegenden Dokumentation

Die vorliegende Dokumentation «Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern» soll in allgemeinverständlicher Form die Grundlagen der Vergärung wie auch detailliertere Angaben zum praktischen Einsatz von Gärprozessen vermitteln.

In den ersten vier Kapiteln wird zunächst der Stellenwert der Vergärung in der Abfallverwertung umrissen. Dann werden Grundlagen vermittelt: es

werden neben biologischen und verfahrenstechnischen Grundlagen auch rechtliche Aspekte der Biogasgewinnung angeschnitten.

Im fünften Kapitel werden die Stoffarten und -mengen dargestellt, welche für eine Vergärung in Frage kommen. Daraus wird das Biogaspotential der Vergärung von festen biogenen Abfällen und von Industrieabwässern abgeleitet. In diesem Kapitel werden ebenfalls die bereits bestehenden Anlagen in der Schweiz und in Europa aufgelistet. Das Kapitel leitet damit zum zweiten Teil der Dokumentation über, welche Praxisbeispielen gewidmet ist.

In den verbleibenden drei Kapiteln werden Realisationen aus der Praxis vorgestellt und vertiefte Informationen zur Vergärung von Industrieabwässern und von festen Abfällen vermittelt. Abschliessend werden Angaben zur Ökonomie der Vergärung vorgestellt. Während die vorangegangenen Kapitel in ihren Aussagen mehrheitlich nur unwesentlichen Änderungen unterworfen sind, ist bei den ökonomischen Beispielen festzuhalten, dass die Kosten sich auf Momentaufnahmen in den Jahren 1990-92 beziehen. Sie wurden damals für konkrete Realisationen in eine vergleichbare Form gebracht. Mit der Erfahrung von

weiteren Praxisanlagen und natürlich auch in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort sind im Verlauf der Zeit Kostenabweichungen nach oben wie auch nach unten durchaus wahrscheinlich.

Nach einer Vernehmlassung ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatte das Autoren-Kollektiv freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen. Bei der Anwendung der Publikation sich zeigende Unzulänglichkeiten können bei einer allfälligen späteren Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen oder direkt der verantwortliche Redaktor, Dr. Werner Edelmann, gerne entgegen (Adresse siehe Anhang).

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen dieser Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Dr. H. Kneubühler
Stv. Direktor des Bundesamtes
für Konjunkturfragen

Inhalt

Stellenwert der Vergärung in der Abfallverwertung	7
Geschichte der Abfallentsorgung	7
Technologien zur Abfallentsorgung	7
Richtlinien für die Abfallbewirtschaftung in der Schweiz	8
Der Stellenwert der Vergärung	9

Rechtliche Voraussetzungen der Biogasgewinnung	11
Allgemeine Vorschriften	11
Anlagen zur Vergärung fester Abfälle	12
Anlagen zur Vergärung flüssiger Abfälle	12

Biologische Grundlagen der Vergärung	15
---	-----------

Verfahrenstechnische Grundlagen der Vergärung	17
Prozessparameter	17
Fermentertypen	18
Umweltaspekte der Vergärung	21
Einsatzmöglichkeiten der Vergärung	22

Potentiale an festen biogenen Abfällen und Industrieabwässern	25
Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	25
Massenpotential der gärbaren festen Abfälle	27
Potential der gärbaren Industrieabwässer	31
Inventar der in Europa und in der Schweiz bestehenden Anlagen	32
Biogaspotential von festen und flüssigen Reststoffen	34

Behandlung von Industrieabwässern	35
Sinn einer Vorreinigung des Abwassers	35
Vergleich von anaerober und aerober Abwasservorreinigung	36
Voraussetzungen für den Einsatz anaerober Verfahren	35
Beispiel 1 : Kartonfabrik Niedergösgen	38
Beispiel 2 : Brauerei Feldschlösschen, Rheinfelden	40
Beispiel 3 : Zuckerfabrik Aarberg	42

Behandlung von festen biogenen Abfällen	43
Aufbereitung der biogenen Abfälle	43
Vergärung der biogenen Abfälle	43
Nachbereitung der vergorenen Abfälle	47
Kompostierung biogener Abfälle	47
Energieausbeuten von Vergärung und Kompostierung	49
Das Konzept der Kombination von Vergärung und Kompostierung	50
Energiebilanz von kombinierten Anlagen	52
Schlussfolgerungen zur Behandlung von festen biogenen Abfällen	53

Ökonomie der Vergärung	55
Industrieabwässer	55
Vergärung und Kompostierung fester Abfälle	58

Anhang	63
Literaturempfehlungen	63
Adressen der Autoren	64
Verzeichnis der Tabellen und Figuren	65
Publikationen und Videos des Impulsprogrammes PACER	66

Stellenwert der Vergärung in der Abfallverwertung

Geschichte der Abfallentsorgung

Im Mittelalter wurden die Abfälle vermischt mit Exkrementen in den Gassen in die offenen Kanäle vor den Häusern geschüttet, wo sich Schweine und Kleingetier tummelten. Nachdem die hygienischen Zustände unhaltbar geworden waren, begannen im 15. und 16. Jahrhundert verschiedene europäische Städte die Abfälle zu sammeln, um sie ausserhalb der Stadtmauern deponieren zu können. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts verfügten die Schweizer Städte über einen regelmässigen Einsammeldienst für die Abfälle. Während früher noch beinahe alles Material organischer Natur war und so entweder direkt oder in Form von Mist oder Kompost auf die Felder zurückgeführt werden konnte, nahm nun der Anteil an biologisch nicht abbaubaren Produkten stetig zu. Dies bewirkte, dass die Stadt Zürich als erste Schweizer Stadt 1899 die Errichtung einer Kehrichtverbrennungsanlage beschloss. Andere Städte entschlossen sich - trotz der Aenderung der Kehrichtzusammensetzung - für eine Kehrichtkompostierung. 1937 entledigten sich von 379 schweizerischen Gemeinden 370 ihrer Abfälle durch Deponie, Zürich und Davos verbrannten die Abfälle, während die übrigen sieben sie kompostierten. Das Gewässerschutzgesetz von 1955 verlangte, dass die Haushaltsabfälle ohne Gewässerverschmutzung beseitigt werden müssten und bewirkte dadurch den Bau von Kehrichtverbrennungsanlagen. Heute sind in der Schweiz 31 Kehrichtverbrennungsanlagen in Betrieb. Die Anlagen zur Kompostierung von Gesamtkehricht nahmen zwischen 1973 und 1987 von 17 auf 7 ab, was darauf zurückzuführen ist, dass bei der Kompostierung von Gesamtkehricht der Kompost mit Schadstoffen belastet wird. Die Kompostierung von nachträglich separiertem Gesamtkehricht wird aufgrund der eidgenössischen Abfallverordnung (TVA) nicht mehr als eine gangbare Lösung betrachtet.

Der Schweizer produziert heute pro Jahr rund eine Tonne Abfall. Darin eingeschlossen sind Bauabfälle sowie Trockensubstanz aus Kläranlagen und Sondermüll. Daneben sammelt er über 100 kg Glas, Papier und Metalle, welche direkt dem Recycling zugeführt werden. Während pro Kopf der Bevölkerung zu Beginn des Jahrhunderts nur einige Dutzend Kilogramm Haushaltsabfälle anfielen, landen heute über 400 kg Abfall pro

Jahr in den Kehrichtsäcken. Vor allem die Anteile an Papier, Karton, Plastik und andern Verpackungsmaterialien sowie auch von Küchenabfällen hat heute stark zugenommen.

Technologien zur Abfallentsorgung

Zur Beseitigung bzw. Verwertung von Haushaltsabfällen bieten sich verschiedene Techniken an. Die **Ausbreitung von Abfällen auf Landwirtschaftsland** kommt heute kaum mehr in Frage, mit Ausnahme von Klärschlamm, welcher jedoch die entsprechenden Grenzwerte bezüglich von Schwermetallen und anderen Schadstoffen einhalten muss.

In der dicht besiedelten Schweiz ist der Raum für **Deponien** knapp geworden. Man unterscheidet drei Gruppen von Deponien, nämlich a) für inerte Stoffe wie beispielsweise Aushubmaterial, b) für weitgehend inerte Stoffe wie Bauschutt und c) für bioaktive Abfälle, d.h. für Stoffe, welche durch biologische Prozesse noch verändert werden können. Haushaltsabfälle gelangen in Deponien der dritten Kategorie. Die Deponie von Haushaltsabfällen ist insofern problematisch, als während mehrerer Jahrzehnte nach Schliessung der Deponie noch Gase, bzw. während mehrerer Jahrhunderte belastete Sickerwässer austreten. Neue Deponien sind oft für ein speziell rasches Ausgasen, d.h. für den Abbau des leicht abbaubaren organischen Materials durch Mikroorganismen ausgerichtet. Bei dieser Gelegenheit kann entstehendes Methangas aufgefangen und verwertet werden.

Wie bereits oben erwähnt, hat die **Kompostierung** von Gesamtmüll heute an Bedeutung verloren. Andererseits ergeben sich jedoch für die biotechnologische Verwertung von separat eingesammelten biogenen Haushaltsabfällen heute neue Möglichkeiten (vergleiche unten).

Durch die **Verbrennung von Haushaltsabfällen** wurden wohl verschiedene Probleme (unkontrollierte Deponie, Gewässerverschmutzung, etc.) gelöst, jedoch gleichzeitig auch neue geschaffen. Insbesondere die neue Zusammensetzung des Haushaltskehrichts hat in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts zu einer starken Luftverschmutzung durch Kehrichtverbrennungsanlagen geführt.

Infolge der eidgenössischen Luftreinhalteverordnung von 1985 müssen bei den Kehrrechtsverbrennungsanlagen kostspielige Einrichtungen zur Abluftreinigung eingebaut werden. Dadurch werden zwar die Schadstoffbelastungen in der Abluft gewaltig gesenkt; es entstehen jedoch neue Probleme für die Beseitigung der dabei anfallenden Filterstäube und Waschwasser aus der Abluftreinigung.

Richtlinien für die Abfallbewirtschaftung in der Schweiz

Seit dem Mittelalter hat sich die Abfallbeseitigung dadurch ausgezeichnet, dass nach neuen Lösungen gesucht wurde, wenn akute Probleme auftraten. Diese neuen Lösungen zeigten jedoch im Laufe der Entwicklung ihrerseits immer wieder schädliche Nebenwirkungen, welche weitere Massnahmen erforderten. Mit dem eidgenössischen Umweltschutzgesetz von 1983 und seinen Ausführungsbestimmungen, insbesondere mit der Abfallverordnung von 1990, wurde daher nun versucht, die Abfallbewirtschaftung unter einem ganzheitlichen Rahmen zu betrachten und ganzheitliche Lösungen zu verwirklichen.

Die dem Umweltschutzgesetz und der TVA entsprechenden wichtigsten Prinzipien einer umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung mit den Zielen Abfallvermeidung und -reduktion können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Vermeidung der umweltbelastenden Konsumgüter:

Das einzige wirklich wirksame Mittel zur Reduktion der Umweltbelastung ist, die Anwendung von gefährlichen Substanzen zu vermeiden (z.B. ozongefährdende Teibgase, PVC, Quecksilber und andere Schwermetalle). Gleichzeitig soll durch neue Produktionsmethoden bei der Herstellung von Konsumgütern Abfall vermieden werden.

2. Verbesserung der Güterproduktion:

Durch Einbezug des Abfallaspekts in den Produktionsprozess sollen die Abfallmengen, welche bei der Güterproduktion als Nebenprodukte entstehen, eingedämmt werden.

3. Orientierung der Konsumenten:

Durch eine umfassende Orientierung der Konsumenten sollen diese bewegt werden, umweltbe-

wusst einzukaufen, d.h. dauerhafte und reparierbare Güter zu erstehen, auf Wegwerfartikel nach Möglichkeit zu verzichten und Güter zu bevorzugen, welche bei Herstellung, Vertrieb und Beseitigung die Umwelt weniger belasten.

4. Separate Erfassung der Abfallstoffe:

Durch eine separate Erfassung der einzelnen Abfälle wird deren Verunreinigung durch andere Stoffe verhindert und eine effiziente Wiederverwertung ermöglicht. In der Schweiz wurden 1989 beinahe 1 Mio. to. Abfälle separat eingesammelt (613 000 to. Papier, 178 000 to. Glas, 140 000 to. organisches Material, 12 000 to. Textilien und 1200 to. Aluminium). Nach Schätzungen des BUWAL könnte diese Menge noch um rund eine halbe Million to. erhöht werden. Dazu kommen mehr als 1,5 Mio. to. biogene Abfälle, welche in Zukunft separat erfasst werden müssen. Unter dem Begriff biogene Abfälle versteht man Abfälle biologischen Ursprungs, d.h. tierische und pflanzliche Stoffe, welche heutzutage entstanden sind (Plastik und Kunststoffe sind in diesem Sinn als Erdölprodukte zwar organischer Natur, fallen jedoch nicht unter den Begriff «biogen»).

5. Wiederverwertung:

Die separate Einsammlung von Abfällen ermöglicht deren Recycling (Umweltschutzpapier, Glas, Aluminium, Metalle etc). Durch Kompostierung und durch die in diesem Buch beschriebene Vergärung kann aus biogenen Abfällen Kompost für die Landwirtschaft wie auch erneuerbare Energie gewonnen werden. So können dem Boden wertvolle Nährstoffe zurückgeführt und die Humusbilanz ausgeglichen werden. Ebenfalls sollen überall dort, wo die Qualität es zulässt, Klärschlämme in die Landwirtschaft zurückgeführt werden.

6. Sichere Deponie der stabilisierten Reststoffe:

Durch die getrennte Erfassung und Behandlung möglichst vieler Stoffklassen wird die verbleibende Restmüllmenge drastisch verkleinert. Durch Verbrennung und andere Massnahmen sollen die Reststoffe in eine möglichst inerte Form gebracht werden, welche ihre Endlagerung in einer professionell betreuten, kontrollierten Deponie erlaubt. Sofern im Abfall noch biologisch aktive Substanzen vorhanden sind (z.B. Klärschlämme, etc.) ist eine professionelle Entgasung der Deponie mit Biogasnutzung vorgegeben.

Der Stellenwert der Vergärung

Unter dem Begriff Vergärung versteht man den Abbau von biogenem Material durch Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff, d.h. unter anaeroben Bedingungen. Mehrere Bakteriengruppen, welche sehr eng zusammenarbeiten, verwandeln biogenes Material in Biogas. Biogas besteht aus etwa $\frac{2}{3}$ brennbarem Methan und rund $\frac{1}{3}$ Kohlendioxid sowie Restgasen. Die anaeroben Bakterien sind erdgeschichtlich uralt, d.h. sie entwickelten sich, als es in der Erdatmosphäre noch keinen Sauerstoff gab. Sie bauen mit Ausnahme von Holz, dessen Bestandteil Lignin sie nicht angreifen können, praktisch alles biogene Material ab. Da der Hauptteil der Energie des abgebauten Materials im Produkt Methan noch enthalten ist, bleibt den Bakterien nur wenig Energie zum Leben und zur Vermehrung. Bei der Vergärung wird daher – im Gegensatz zur Kompostierung – keine Überschussenergie in Form von Wärme frei.

Die anaerobe Vergärung ist im Gegensatz zur Kompostierung, wo sich auch primitive Pilze und andere niedere Lebewesen am Abbau beteiligen, ein rein bakterieller Prozess. Die anaeroben Bakterien fühlen sich im Wasser oder sehr feuchter Umgebung wohl. Anaerobe Abbauprozesse eignen sich daher speziell für leicht abbaubare, nasse und feuchte Substrate. In diesem Sinn kommt der Vergärung in der Bewirtschaftung von biogenen Abfällen eine wichtige Rolle zu: Nasse und feuchte biogene Abfälle führen bei der Kompostierung sehr oft zu Problemen (vergleiche unten). Hier kann durch eine Vergärung das separat erfasste, leicht abbaubare organische Material einfach in Biogas und in (anaeroben) Kompost umgewandelt werden.

Neben festen biogenen Abfällen bieten sich aber für die Vergärung ganz speziell auch organisch belastete Abwässer aus Industrie und Gewerbe an. Die anaerobe Behandlung bringt – neben einer meist deutlich positiven Energiebilanz – den Vorteil, dass weniger Bakterienbiomasse und damit weniger Schlamm gebildet wird. Bis vor kurzer Zeit wurden zur Abwasserreinigung vor allem aerobe Prozesse eingesetzt mit einer allfälligen anaeroben Behandlung des dabei anfallenden Schlammes. Dank der neu entwickelten anaeroben Hochleistungsprozesse ist es jedoch heute möglich und sinnvoll, die anaerobe Reinigung

einer aeroben Nachbehandlung voranzustellen. Dadurch entsteht weniger Schlamm bei gleichzeitig deutlich höherer Energieausbeute und tieferen Betriebskosten. Man könnte sich heute sogar vorstellen, dass mittelfristig auch in kommunalen Kläranlagen – anders als zur Zeit noch üblich – die anaerobe Stufe der aeroben vorgeschaltet wird.

Der anaeroben Gärung kommt daher gemäss dem heute geltenden Abfallbewirtschaftungskonzept einerseits bei der Aufbereitung von Abwässern und andererseits bei der Verwertung des sehr grossen Potentials an nassen, festen biogenen Abfällen aus Küche, Garten, Industrie und Landschaftspflege eine sehr grosse Bedeutung zu.

Nach dem Aktionsprogramm «Energie 2000» des Bundes sollen bis ins Jahr 2000 rund 0,5% der Elektrizität und 3% des Wärmebedarfs aus alternativen, erneuerbaren Energiequellen (Sonne, Wind, Biogas und Geothermie) gedeckt werden. Diese an sich bescheidenen Zielvorgaben erfordern trotzdem recht bedeutende Anstrengungen. Im Programm «Energie 2000» wird unterstrichen, dass man sich kurzfristig keinen Illusionen bezüglich der Lösung der Energieproblematik hingeben darf; jedoch auch kleinere Substitutionen von konventionellen Energieträgern sind aus Sicht der Luftreinhaltung und des Umweltschutzes höchst wertvoll. So sind beispielsweise die erneuerbaren Energieträger – inklusive Biogas – bezüglich des Treibhausgases CO₂ neutral, was heisst, dass sie nicht zum Treibhauseffekt beitragen.

Rechtliche Voraussetzungen der Biogasgewinnung

Je nachdem, ob feste oder flüssige Abfälle behandelt werden, kommen unter Umständen nicht dieselben Vorschriften zur Anwendung. Diese Vorschriften können sowohl dem Privatrecht als auch dem öffentlichen Recht entstammen. Was das **Privatrecht** anbelangt, scheinen Biogasanlagen keine für sie typischen Probleme zu stellen. Man könnte sich höchstens Konflikte bezgl. der Nachbarschaft (Art. 684, ZGB), der Haftung des Eigentümers (Art. 679, ZGB) oder des Bauherrn (Art. 58, OR) vorstellen. Da diese Fragen jedoch nicht nur für Biogasanlagen typisch sind, wird in der Folge Schwergewicht auf das öffentliche Recht gelegt.

Von den verschiedenen Bereichen des **öffentlichen Rechts**, welche in Frage kommen, wird zuerst auf die Vorschriften eingegangen, welche Biogasanlagen allgemein betreffen. Darauf wird auf Vorschriften bei der Vergärung fester Abfälle und schliesslich auf jene flüssiger Abfälle eingegangen.

Allgemeine Vorschriften

Aufgrund ihrer Grösse und ihrer eventuell möglichen Emissionen (siehe unten) können Biogasanlagen nicht in reinen Wohnzonen oder auch in gemischten Zonen erstellt werden. Ihr Platz ist daher im Industriegebiet zu finden.

Man könnte sich allenfalls fragen, ob eine Anlage in Anwendung des Art. 24 des Bundesgesetzes über Raumplanung ausserhalb der Bauzone bewilligt werden könnte. Allerdings erscheint die Frage eher akademisch in dem Sinn, dass die Anlagen ja in der Regel möglichst nahe am Ort, wo die Abfälle anfallen, erstellt werden, d.h. im Industriegebiet und in der Nähe von Agglomerationen. Auf jeden Fall müssen die sehr strikten Voraussetzungen des Bundesgesetzes respektiert werden; insbesondere müsste nachgewiesen werden können, dass der Zweck der Anlage einen bestimmten Standort zwingend erfordert – was bei einer Gäranlage schwierig sein dürfte. Beim Bau einer Gemeinschaftsanlage von mehreren Gemeinden würde nach jüngster Rechtsprechung des Bundesgerichts kaum eine Ausnahmewilligung nach Art. 24 des Raumplanungsgesetzes als genügend erachtet, sondern die Erstellung eines Sondernutzungsplans verlangt.

Bau und Betrieb der Anlage müssen zudem den formellen und materiellen Vorschriften der Baupolizei Rechnung tragen: Zonenvorschriften (in der Regel kommunal) sowie meist kantonale Vorschriften über die Sicherheit und Auflagen bezüglich Hygiene und gesundheitlichen Aspekten. Besondere Aufmerksamkeit ist den Vorschriften der Feuerpolizei zu widmen: die Vereinigung der Kantonalen Feuerversicherungen hat in diesem Zusammenhang Richtlinien über den Bau und Betrieb von Biogasanlagen erlassen. Diese Richtlinien umfassen Vorschriften über die Wahl geeigneter Baumaterialien, Vorschriften für Nieder- und Hochdruckgasspeicher (im letzteren Fall bestehen zusätzlich auch Vorschriften des SVDB), Sicherheitsabstände, Sicherheitsvorkehrungen gegen Aufbau von Ueberdruck, Unterdruck oder Gasverlust, Einbau von Flammenrückschlagsicherungen, Materialwahl für die Verrohrungen und Sanitärinstallationen, Belüftung von Speicherbehältern etc. Wie der Name sagt, haben diese Richtlinien nicht direkt Gesetzeskraft; kantonale oder kommunale Gesetze können jedoch auf die Richtlinien verweisen und ihnen so auf Verordnungsebene Gesetzescharakter verleihen. Ebenso können Behörden die Einhaltung der Richtlinien als Auflage bei der Baubewilligung und der Betriebsbewilligung verlangen.

Gleichzeitig müssen die Gesetze des eidgenössischen Umweltschutzgesetzes vom 7.10.83, der Luftreinhalteverordnung vom 16.12.85, der Lärmverordnung vom 15.12.86 sowie die Verordnung vom 19.10.88 zur Prüfung der Umweltverträglichkeit eingehalten werden.

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass das Bundesrecht eine Umweltverträglichkeitsprüfung für Anlagen, welche der Sortierung, der Behandlung, dem Recycling oder der Verbrennung von Abfällen dienen, verlangt, sofern deren Verarbeitungskapazität 1000 t/a übersteigt. Gasspeicher von über 50 000 m³ (Normalbedingungen) verlangen den Bericht ebenso wie Gasleitungen im Sinn von Art. 1 des Bundesgesetzes vom 4.10.63 über Leitungstransport von flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, sofern deren Bau und Betrieb einer Konzession unterliegt. Auch wenn eine Umweltverträglichkeitsprüfung durch Bundesrecht nicht vorgeschrieben wäre, können die Kantone trotzdem einen Umweltverträglichkeitsbericht verlangen. Speziell sei erwähnt, dass dem Verkehrsaufkommen, welches mit dem Betrieb von Anlagen zur Behandlung von Haushaltsabfällen einhergeht, Rechnung zu tragen ist.

Bezüglich der Emission von Lärm scheinen Gäranlagen keine speziellen Probleme darzustellen; es ist trotzdem im konkreten Fall auf die Einhaltung der im Bundesgesetz festgehaltenen Grenzwerte zu achten.

Bei der Verbrennung von Biogas kann neben CO₂ auch Schwefeldioxid freigesetzt werden. Es ist in diesem Fall auf die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung zu achten und allenfalls eine Entschwefelung des Gases vorzusehen. Unter Umständen sind konstruktive Massnahmen (Form und Dimension des Kamins, etc.) vorzunehmen.

Weitere Aspekte des Umweltschutzes werden weiter unten behandelt. Sofern das produzierte Biogas der öffentlichen Versorgung dient, können sich weitere Rechtsfragen stellen, wie die Erteilung einer Konzession für den Transport und/oder die Verteilung von Energie oder für das Verlegen von Gasleitungen unter öffentlichem Grund.

Anlagen zur Vergärung fester Abfälle

Zunächst stellt sich die Frage der Einordnung der Vergärung in ein globales Abfallverwertungskonzept.

Voraussetzung für eine mögliche Vergärung ist ein relativ homogenes, nicht mit Fremdstoffen belastetes Ausgangsmaterial. Dies trifft bei industriellen Prozessen meist zu, kann jedoch im Fall von kommunalen Abfällen und bei Gemeinschaftsanlagen zum Problem werden. Um das Gärgut nicht mit Schwermetallen und anderen toxischen Substanzen zu belasten, ist eine separate Erfassung der Abfälle an der Quelle Voraussetzung. Gemäss der eidgenössischen Abfallverordnung (TVA) vom 10.12.90 sind die Kantone angehalten, darüber zu wachen, dass die kompostierbaren Abfälle, welche nicht direkt (z.B. im Hausgarten) verwertet werden, nach Möglichkeit separat eingesammelt und aufbereitet werden. Die Kantone verfügen demzufolge über ein Instrumentarium, um die separate Erfassung an der Quelle durchzusetzen.

Sodann stellt sich die Frage nach dem Platz einer Gäranlage im Rahmen des lokalen Abfallverwertungskonzepts: Hier muss zwischen öffentlichen und privaten Anlagen unterschieden werden.

Die TVA verpflichtet die Kantone, Konzepte zur Bewirtschaftung der Abfälle zu erstellen, insbesondere Einzugsgebiete auszuscheiden und zu umschreiben, diesen Zonen je eine Verwertungsanlage zuzuschreiben und darüber zu wachen, dass die Abfälle der verschiedenen Gebiete den jeweiligen Anlagen zugeführt werden. Diese Direktiven, welche in erster Linie für Haushaltsabfälle formuliert wurden, können ebenfalls auf andere Abfallkategorien ausgeweitet werden, wenn dies nötig ist, um eine umweltgerechte Entsorgung sicherzustellen. Sie können daher sinngemäss generell Anwendung finden für methanisierbare Abfälle und erlauben, (Gemeinschafts-) Anlagen zur Vergärung in das Abfallverwertungskonzept einzubeziehen.

Die privaten Anlagen dürften unter Art. 12 der TVA fallen, welcher erlaubt, vom Inhaber eines Industrie-, Gewerbe- oder Dienstleistungsbetriebs zu verlangen, dass er abklärt, ob für seine Abfälle Möglichkeiten zur Verwertung bestehen oder geschaffen werden können und dass er die Behörden über die Ergebnisse seiner Abklärungen informiert. Von Inhabern von Abfällen kann verlangt werden, dass sie für die Verwertung bestimmter Abfälle sorgen, wenn die Verwertung technisch möglich und wirtschaftlich tragbar ist sowie dadurch die Umwelt weniger belastet wird als durch die Abfallbeseitigung und gleichzeitiger Neuproduktion der bei einer Verwertung entstehenden Produkte.

Da die Gäranlagen zur Vergärung fester Abfälle Schlämme und Abwässer erzeugen, entstehen auch in diesem Bereich Probleme aus Sicht des Umweltschutzes. Da diese jedoch denjenigen der Flüssigvergärung entsprechen, werden sie dort behandelt.

Schliesslich scheint es sinnvoll zu erinnern, dass nach Art. 20 der TVA die Kantone angehalten sind, nach Möglichkeit die erforderlichen Bewilligungsverfahren zu koordinieren, insbesondere für die Raumplanungs-, Rodungs- und Gewässerschutzbewilligungen und ähnliche Verfahren.

Anlagen zur Vergärung flüssiger Abfälle

Bei der Vergärung flüssiger Abfälle stellen sich speziell Fragen der Aufbereitung des «Outputs»

an Abwasser und Schlamm. Tangiert wird neben dem Umweltschutzgesetz vor allem das Gewässerschutzgesetz.

Die entstehenden Schlämme unterliegen der Klärschlammverordnung vom 8.4.81, welche eine zusätzliche Hygienisierung verlangt, sofern der vorgeschriebene Hygienisierungsgrad nicht erreicht wird, bevor der Schlamm auf Landwirtschaftsflächen ausgebracht werden darf. Ebenso wird das Ausbringen in dieser Verordnung geregelt (Verfügbarkeit von genügend grossen Flächen, Verbot auf gewissen Böden auszubringen, allgemeine Regeln über das Ausbringen). Bezüglich der Schwermetalle dürften die separat erfassten biogenen Abfälle in keinem Fall Probleme aufwerfen, da bei dieser Erfassungsweise normalerweise keine Möglichkeit der Kontamination besteht.

Bezüglich der Abwässer sind die Bestimmungen der Verordnung vom 8.12.75 über Abwassereinleitungen zu berücksichtigen. Sofern sie die Einleitungsbedingungen erfüllen, können sie direkt der öffentlichen Kanalisation übergeben werden. Andernfalls ist vor der Einleitung eine weitere Behandlungsstufe vorzusehen. Schliesslich kann im Fall, wenn die Abwassermengen eine bestimmte Menge überschreiten, die Erstellung einer privaten Reinigungsanlage gefordert werden.

Biologische Grundlagen der Vergärung

Wie bereits erwähnt, ist die anaerobe Vergärung von biogenen Abfällen ein biologischer Prozess, bei welchem organisches Material in Abwesenheit von Sauerstoff durch Bakterien abgebaut wird. Dabei wird Biogas gebildet, welches zu rund $\frac{2}{3}$ aus Methan, rund $\frac{1}{3}$ aus Kohlendioxid und Restgasen, wie Schwefelwasserstoff besteht. Der Abbau erfolgt durch verschiedene Gruppen von Bakterien, welche in verschiedenen Schritten die zum Teil sehr grossen organischen Moleküle in Biogas umwandeln. Man unterscheidet in der Praxis drei Temperaturbereiche, bei welchen die Vergärung abläuft:

Den **psychrophilen Temperaturbereich**, d.h. «kalten» Bereich bei Temperaturen von 15 - 25° C, den **mesophilen** Temperaturbereich bei rund 30 - 35° C, sowie den **thermophilen** Temperaturbereich bei Temperaturen zwischen 50 und 60° C.

Für eine optimale Gärung sind **pH-Werte** von 7 - 7,5 optimal; unterhalb eines pH von rund 6,8 bzw. oberhalb von 7,8 bis 8 kommt die Gärung praktisch zum Erliegen. Damit die Bakterien optimal wachsen können, ist natürlich ein ausreichendes Nährstoffangebot nötig. Allerdings ist die Nährstoffkonzentration weniger kritisch als bei der aeroben Behandlung, da pro abgebautem Material weniger Bakterienbiomasse gebildet wird und damit der Nährstoffbedarf kleiner ist.

Beim **aeroben Abbau** werden die organischen Verbindungen oxidiert und es entsteht als Abbauprodukt Wasser, CO₂ und Bakterienbiomasse. Den aeroben Bakterien steht dabei der gesamte Energieinhalt der organischen Verbindungen zum Wachstum zur Verfügung. Aerobe Bakterien setzen daher beim Abbau vom organischen Material Wärme frei. Da sie über viel Energie verfügen, wachsen sie sehr schnell und verdoppeln sich innerhalb von Stunden. Da beim aeroben Abbau die Energieversorgung nicht problematisch ist, können verschiedene aerobe Bakterien den gesamten Abbau von komplexen Molekülen bis zum Endprodukt CO₂ und Wasser allein vornehmen. Beim aeroben Abbau arbeiten daher verschiedene Bakteriengruppen parallel.

Beim **anaeroben Abbau** steckt hingegen über 90% der Energie des Ausgangsmaterials im Abbauprodukt Methan, welches später für energetische Zwecke genutzt werden kann. Dies hat zur Folge, dass die anaeroben Bakterien mit sehr wenig Energie für ihr eigenes Wachstum auskommen müssen. Anaerobe Bakterien verdoppeln

sich in der Regel unter mesophilen Bedingungen einmal innerhalb von 7 bis 14 Tagen. Auch wird beim anaeroben Abbau kaum Wärme frei, was bewirkt, dass das Ausgangsmaterial auf mesophile bzw. thermophile Betriebstemperatur aufgeheizt werden muss. Aus thermodynamischen Gründen ist es nicht möglich, dass ein einzelner Organismus auf anaerobem Weg das Ausgangsprodukt bis zu den Endprodukten Methan und Kohlendioxid abbaut. Für den anaeroben Abbau sind in der Regel drei Bakteriengruppen verantwortlich, welche sehr eng und in Serie zusammenarbeiten. Da sich der anaerobe Abbau an den Grenzen dessen bewegt, was unter energetischen Gesichtspunkten für Lebewesen überhaupt noch möglich ist, sind anaerobe Bakterien auf relativ **hohe Substratkonzentrationen** von über 50 bis 100 Milligramm pro Liter angewiesen. (Aerobe Organismen sind im Gegensatz dazu in der Lage noch Konzentrationen von unter Umständen weniger als einem Milligramm pro Liter zu verwenden).

Anaerobe Bakterien sind in der Lage, Kohlenstoffverbindungen wie Eiweisse, Fette und Kohlehydrate abzubauen. Substrate mit einem relativ höheren Anteil an Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen, wie beispielsweise Fette, liefern dabei pro abgebautem Material generell mehr Energie in Form von Methan. Folglich ist die anaerobe Vergärung vorteilhaft für die Behandlung von festen biogenen Abfällen und von stark belasteten Abwässern. Die aerobe Behandlung andererseits ist wirksamer zur möglichst vollständigen Elimination von noch verbleibenden Restverschmutzungen. Wie schon weiter oben erwähnt, kann der Holzbestandteil Lignin durch anaerobe Bakterien nicht abgebaut werden; für verholzte Abfälle kommt daher nur der aerobe Abbauweg in Frage, wo das Lignin durch Pilze geknackt wird.

Anaerobe Bakterien kommen in der Natur überall dort vor, wo kein Sauerstoff zum Abbau von organischem Material vorhanden ist: Etwa am Grund von verschmutzten Gewässern oder in Sümpfen (Irrlichter sind entzündetes Biogas) oder im Pansenmagen von Wiederkäuern (eine Kuh rülpst pro Tag rund 400 Liter Methan). Der Abbau des organischen Materials geht dabei durch die Zusammenarbeit von **drei Bakteriengruppen** folgendermassen vor sich:

In einer ersten Stufe erfolgt eine **Hydrolyse**, bei welcher grosse organische Moleküle von Enzymen in kleinere Bruchstücke zerlegt werden.

Lange Stärkekettens werden beispielsweise in einzelne Zuckermoleküle oder Eiweisse in die einzelnen Aminosäuren zerlegt. Anschliessend werden die nun vorhandenen Einzelbausteine durch dieselben Bakterien weiter abgebaut. Bei dieser sogenannten **Säurebildung** entstehen verschiedene Gärprodukte wie organische Säuren (Propionsäure, Buttersäure, Milchsäure, eventuell bereits Essigsäure) und Alkohole.

In einem zweiten Schritt, der sogenannten **Essigsäurebildung**, werden die Reaktionsprodukte der ersten Gruppe in die Vorläuferstoffe von Biogas, nämlich in Essigsäure, CO₂ und Wasserstoff umgewandelt. Dem Wasserstoff kommt bei dieser Reaktion eine Schlüsselrolle zu, denn nur bei sehr tiefen Wasserstoffpartialdrücken können beispielsweise Reaktionsprodukte wie Propion- oder Buttersäure noch mit einem kleinen Energiegewinn in Essigsäure umgewandelt werden.

In der nun folgenden dritten Stufe, der **Methanbildung**, entsteht durch die eigentlichen Methanbakterien das Biogas. Rund 70% des Biogases wird durch die Spaltung von Essigsäure in CO₂ und CH₄ gebildet; rund 30% entsteht durch die Verbindung von Wasserstoff und CO₂ zu CH₄ und Wasser. Die Methanbildung ist sehr eng an den Abbau von Propionsäure geknüpft, da die Methanbildner dafür sorgen müssen, dass der Wasserstoffpartialdruck nicht zu hoch wird, indem sie den Wasserstoff laufend zu Methan umsetzen. Alle Methanbildner können aus H₂ und CO₂ Biogas erzeugen. Die Bildung von Biogas aus Essigsäure ist energetisch ungünstiger; sie kann daher nur von einem Teil der methanbildner Bakterien bewerkstelligt werden. Trotzdem entsteht der grössere Teil des Biogases aus Essigsäure.

Alle drei erwähnten Prozesse laufen in einer Biogasanlage gleichzeitig, jedoch oft nicht mit gleicher Geschwindigkeit, ab. Der **geschwindigkeitsbestimmende Schritt** der Biogasbildung ist normalerweise die Hydrolyse. Speziell Zellulose und Hemizellulose, welche in biogenen Abfällen normalerweise recht häufig vorkommen, sind durch die Bakterien nur langsam zu hydrolysieren. Sofern grosse Mengen an leichtabbaubaren Verbindungen vorliegen, wie beispielsweise in gewissen Abwässern von Brennereien oder Molkereien sowie in gewissen Küchenabfällen, kann die Methanbildung zum geschwindigkeitsbestimmenden Schritt werden, da sich die Säurebildner in diesem Fall relativ rasch vermehren.

Es ist dann darauf zu achten, dass nicht zuviel Material in den Reaktor gegeben wird, da sonst durch die hydrolytischen Bakterien ein Uebermass an Säuren produziert wird, welche den pH-Wert auf eine ungünstige Grösse absinken lassen. Durch diese Versauerung wird die Methanbildung verlangsamt, was zu einer zusätzlichen Anhäufung von Säuren führt; dies bewirkt schliesslich, dass der Prozess zum Erliegen kommt.

Gewisse Stoffe sind für die am Abbau beteiligten Bakterien **toxisch**. So reagieren beispielsweise die Bakterien sensibel auf hohe Ammonium/Ammoniak-Konzentrationen, an welche sie sich nur langsam adaptieren. Desinfektionsmittel und gewisse Antibiotika können ebenfalls zu Wachstumsbeschränkungen führen, wobei allerdings nicht alle Antibiotika, welche auf die «moderner» aeroben Bakterien wirken, auch für die anaeroben Bakterien giftig sind. Im Falle von Wachstumsstörungen muss normalerweise die Zufuhr von Frischmaterial vorübergehend eingestellt oder zumindest reduziert werden.

Verfahrenstechnische Grundlagen der Vergärung

Prozessparameter

Der Behälter, in welchem die Vergärung abläuft, wird **Fermenter** (oder auch (Bio-)Reaktor) genannt. Der Fermenter ist im wesentlichen ein luftdicht abgeschlossener, normalerweise isolierter Behälter, in welchem die Bakterien das organische Material abbauen. Je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, in welchem unterschiedliche organische Substanzen gelöst oder in fester Form vorliegen können, wird ein dem Substrat angepasster Fermentertyp gewählt.

Die Gärung läuft – wie bereits oben erwähnt – in drei **Temperaturbereichen** ab: psychrophil, mesophil und thermophil. In höheren Temperaturbereichen ist die Abbaugeschwindigkeit schneller. Beim thermophilen Prozess ist der CO₂-Gehalt des Biogases in der Regel höher, da dessen Löslichkeit im wärmeren Substrat abnimmt. Die Wärme zum Aufheizen des Substrats und zur Beibehaltung der Gärtemperatur muss durch entsprechende Heizeinrichtungen zugeführt werden. Je tiefer der Gehalt an organischem Material des Substrats ist, desto weniger Biogas entsteht und ein prozentualer Anteil des produzierten Biogases muss für die Beheizung aufgewendet werden. Bei der Vergärung von sehr dünnen Substraten (TS-Gehalt unter 2-3%) kann die Energiebilanz der Biogasgewinnung nicht mehr positiv gehalten werden.

Beim **diskontinuierlichen Prozess** («Batch-Prozess») wird der Fermenter zu einem bestimmten Zeitpunkt gefüllt und erst wieder geleert, wenn mehr oder weniger alles Material abgebaut ist. Der diskontinuierliche Prozess hat den Vorteil, dass er technisch sehr einfach ist. Er wird vor allem für feste Abfälle, d.h. für Abfälle mit mehr als rund 15% Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) eingesetzt. Speziell in Entwicklungsländern werden beispielsweise Festmist und Landwirtschafts- oder Haushaltsabfälle in Einfachanlagen diskontinuierlich vergoren. Unter günstigen äusseren Umständen kann bei einfachen Anlagen sogar auf Heizung und Durchmischung verzichtet werden. Durch den Bau von mehreren diskontinuierlichen Fermentern nebeneinander kann einerseits das anfallende Substrat mehr oder weniger kontinuierlich behandelt werden und es entsteht andererseits weniger Schwankungen in der Gasproduktion (zu Beginn kleine Produktion, dann stürmische Phase, welche gegen Ende des Prozesses abflaut), als bei nur einem Fermenter.

Normalerweise werden die Fermenter (**semi-kontinuierlich**) beschickt: dem Fermenter wird regelmässig Frischmaterial zugeführt und gleichzeitig dieselbe Menge an vergorenem Material durch Verdrängung entnommen. Die Gasproduktion ist dadurch in der Regel nur kleineren Schwankungen unterworfen. Kontinuierliche Prozesse führen normalerweise zu einem einfacheren Betriebsablauf und lassen sich in der Regel besser automatisieren als diskontinuierliche. Allerdings sind sie in der Regel technisch aufwendiger, da Substrat transportiert werden muss.

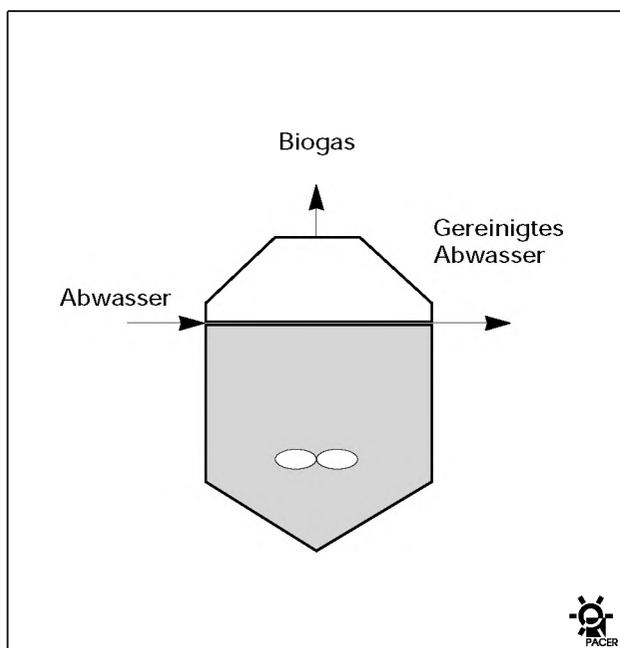
Biotechnologische Prozesse werden durch **Durchmischen** des Substrats verbessert, da dabei Konzentrationsgradienten ausgeglichen werden, der Kontakt zwischen Substrat und Bakterien in der Regel verbessert und der Abtransport von gasigen Abbauprodukten (z.B. Biogas) intensiviert wird. Bei Fermentern werden daher normalerweise Einrichtungen zum Rühren und/oder Durchmischen vorgesehen, welche den Inhalt mehr oder weniger vollständig durchmischen (mechanische Rührer, Einpressen von Gas, (externe) Rezirkulation des Gärguts etc.).

Fermenter zur Vergärung flüssiger Abfälle sind oft **voll durchmisch**t. Dies hat den Nachteil, dass ein Teil des frisch eingebrachten Materials gleich wieder ausgetragen wird und ein anderer Teil zu lange im Fermenter verbleibt (entsprechend geringere Gasausbeute und ungenügende Abtötung von unerwünschten Krankheits- und Unkrautkeimen). Aus Sicht des Gärprozesses günstiger ist der **Pfropfstrombetrieb**, wo das Material auf einer Seite in den Reaktor eintritt, diesen durchwandert und am anderen Ende wieder austritt (kein «Kurzschluss» zwischen Ein- und Austritt). In der Praxis ist es kaum möglich, einen idealen Pfropfstromreaktor zu realisieren, da ein gewisser Durchmischungsgrad nicht verhindert werden kann. Kurzschluss kann auch ausgeschlossen werden, indem man mehrere voll durchmischte Fermenter in Serie betreibt («**Rührkesselkaskade**»).

Unter der **Faulraumbelastung** versteht man die Menge an organischer Substanz oder an CSB («chemischer Sauerstoffbedarf»), welche man einem Fermenter pro m³ Faulraum täglich zuführt (Dimension z.B. kg OS/m³.d). Hohe Faulraumbelastungen von 10-20 kg CSB/m³.d erfordern Hochleistungsreaktoren mit einer grossen aktiven Biomasse, welche in der Lage ist, diese Mengen abzubauen, ohne dass eine Versäuerung eintritt (vgl. oben).

Die **Aufenthaltszeit** des Substrats im Fermenter ist abhängig von Substrateigenschaften und Gärtemperatur, durch welche die Vermehrungsrate der Bakterien beeinflusst wird. Sie errechnet sich aus dem täglich zugeführten Volumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Faulraums. Die Aufenthaltszeit (RT = retention time) muss genügend lang sein, um das Nachwachsen der mit dem vergorenen Material ausgeschwemmten Bakterien zu ermöglichen (Kompensation der Bakterienverluste). Da im mesophilen Bereich Verdopplungszeiten von Bakterien im Bereich von 10 Tagen bis zwei Wochen nicht unüblich sind, weisen konventionelle mesophile Fermenter RT's von rund drei Wochen auf. Bei thermophiler Betriebsweise verkürzt sich die RT auf rund 10 Tage bis zwei Wochen. In Hochleistungsreaktoren ist die RT deutlich kürzer (siehe unten). Bei Substraten, welche sowohl eine flüssige als auch eine feste Phase aufweisen, unterscheidet man zwischen HRT (hydraulic retention time) und SRT (solids retention time), welche unterschiedlich gross sein können.

Die spezifische **Gasproduktion** wird entweder auf das Fermentervolumen bezogen ($\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$) oder in Beziehung zur zugeführten oder abgebauten organischen Substanz gesetzt ($\text{m}^3/\text{kg OS}_{\text{zug. d.}}$, bzw. $\text{m}^3/\text{kg OS}_{\text{abg. d.}}$).



Figur 1: Konventioneller Rührkessel.

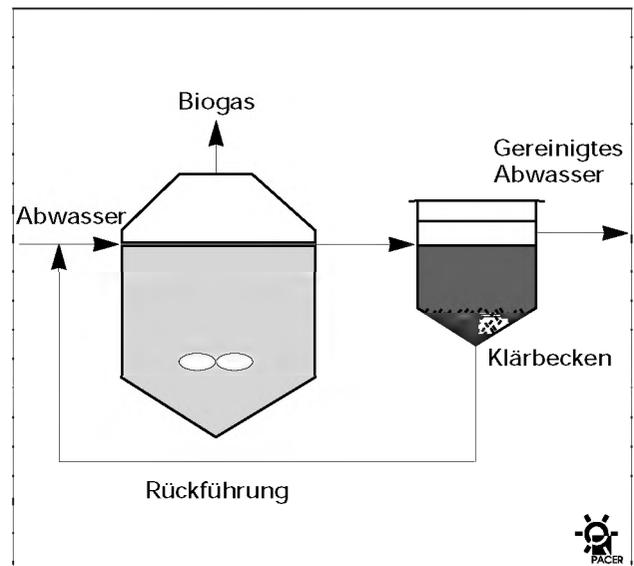
Fermentertypen

In den vergangenen Jahren wurden zur Vergärung flüssiger Substrate neue Fermentertypen entwickelt, welche gegenüber konventionellen Rührkesseln den Vorteil aufweisen, dass die aktive Bakterienbiomasse im Fermenter erhöht ist, was kürzere HRT's möglich macht.

1. Mehr oder weniger voll durchmischte, **konventionelle Fermenter** sind normalerweise zylindrische oder rechteckige Behälter, welche in der Landwirtschaft und zur Vergärung von Klärschlämmen eingesetzt werden. Es sind keine Vorkehrungen zur Rückhaltung der Bakterienbiomasse vorhanden. Konventionelle Fermenter eignen sich insbesondere für Substrate, in welchen die organische Substanz zu einem grossen Teil partikulär, d.h. in Teilchenform, vorkommt (Stroh, Pflanzenreste, etc.). Gülle und Klärschlämme weisen in der Regel TS-Gehalte von 4-8% TS auf; es werden aber auch Substrate mit TS-Gehalten von bis zu maximal 40% TS konventionell vergoren. Die

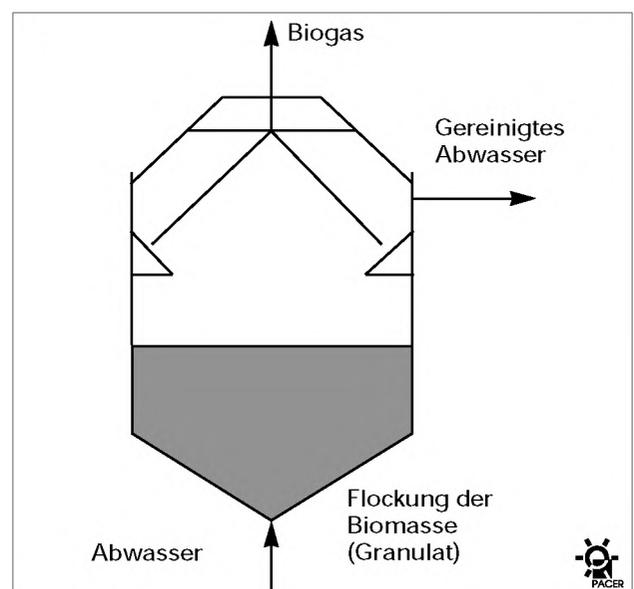
RT beträgt im mesophilen Bereich rund drei Wochen. Bei flüssigen Substraten liegt die obere Faulraumbelastung bei etwa $4 \text{ kg CSB/m}^3\cdot\text{d}$. Die spezifische Gasproduktion liegt in der Regel um rund $1 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$.

- Beim sogenannten **Kontaktprozess** wird das austretende, flüssige Material einer Sedimentation unterworfen, bei welcher die ausgetragenen Bakterien (u.U. zusammen mit nicht vollständig abgebauten Feststoffen) abgeschieden und wieder in den Fermenter zurückgeführt werden sollen. Durch das Rückführen von Biomasse in den Fermenter wird dort die Zahl der aktiven Bakterien erhöht, was erlaubt, die gleiche Abbauleistung in kürzerer Zeit zu vollbringen. Beim mesophilen Betrieb können Kontaktprozesse HRT's im Bereich von 6 bis 10 Tagen aufweisen. Sie können zur Behandlung von stark belasteten Abwässern (CSB über 10 g/l) mit Anteilen an partikulärer organischer Substanz eingesetzt werden. So eignen sich verschiedene Abwässer der Lebensmittelindustrie: Konservenfabriken (Rüsten von Erbsen, Bohnen, Kartoffeln, Rüben etc.), Zuckerfabriken, Schlachthöfe, Brauereien, Brennereien etc. Dank der erhöhten Biomasse im Fermenter sind Belastungen von bis zu $10 \text{ kg CSB/m}^3\cdot\text{d}$ möglich. Die Möglichkeiten des Prozesses werden eingeschränkt durch die oft schlechte Sedimentierbarkeit der Biomasse.



Figur 2: Kontaktprozess.

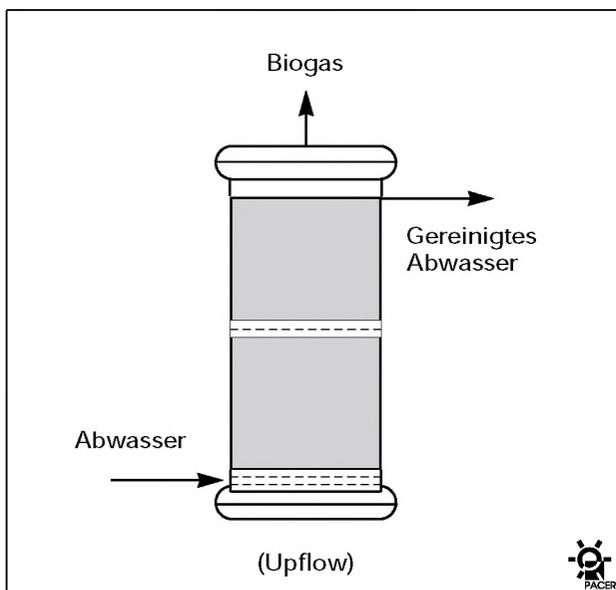
- Beim sogenannten **Schlammbedtreaktor** wird die Tatsache ausgenutzt, dass es unter besonderen Bedingungen möglich ist, eine Bakteriengemeinschaft zu kultivieren, welche in sedimentierbaren Klümpchen (Durchmesser rund 1 mm) aufwächst. Dadurch, dass der Substratstrom von unten nach oben fließt und die hydraulischen Bedingungen im Reaktor so gewählt werden, dass die Bakteriengranulate einerseits in Suspension verbleiben und andererseits oben nicht ausgetragen werden, wird durch die Teilchen eine große aktive Oberfläche erhalten, welche kurze Abbauezeiten im Bereich von Tagen oder sogar Stunden erlaubt. Bekannt ist der Prozess auch unter dem Kürzel **UASB** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Der Prozess eignet sich zur Behandlung von mit gelösten Stoffen belasteten Abwässern. Größere Mengen an partikulärer, suspendierter organischer Substanz sind nicht erwünscht. Der Prozess hat allerdings den Nachteil, dass nicht alle Abwässer die Bildung der Bakterienklümpchen



Figur 3: Schlammbedtreaktor («UASB»).

gleich gut fördern (Kohlenhydrate und niedere Fettsäuren scheinen vorteilhaft zu sein) und dass unter Umständen Betriebsstörungen nicht ausgeschlossen werden können. Faulraumbelastungen von bis zu 20 kg CSB/m³.d sind möglich. Die spezifische Gasproduktion kann - wie auch bei den folgenden Prozessen - bei bis zu 8 m³/m³.d liegen.

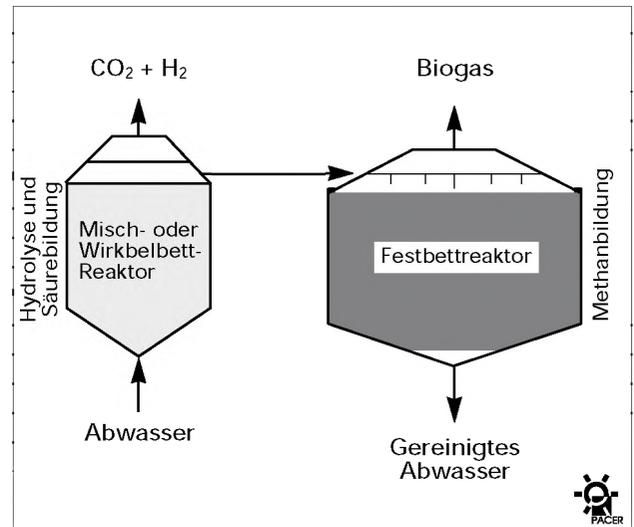
4. Beim **Wirbelbettreaktor** wachsen die Bakterien ebenfalls in Klümpchen auf, in deren Zentrum jedoch ein inerte Kern als Wachstumskeim steckt (z.B. Sandkorn). Weil das spezifische Gewicht dieser Granulate deutlich höher ist als beim UASB, muss eine entsprechend höhere Fließgeschwindigkeit nach oben aufrecht erhalten werden, um die Sedimentation zu verhindern. Je nachdem, ob die Partikel über die gesamte oder nur über einen Teil der Reaktorhöhe suspendiert sind, spricht man von einem «fluidized bed» oder einem «expanded bed». Gegenüber dem UASB mögen die Granulate etwas robuster sein; dafür ist eine viel grössere Betriebsenergiemenge nötig, um das Wirbelbett durch ständiges Umpumpen aufrecht zu erhalten. Die Abbauleistungen sind mit denjenigen eines UASB vergleichbar.



Figur 4: Anaerobfilter im up-flow-Betrieb; beim dynamischen Anaerobfilter wird das Trägermaterial (gepunktet gezeichnet) rhythmisch bewegt.

5. Der **Anaerobfilter** ist ein **Festbettreaktor**; das heisst, dass die Biomasse auf einem im Reaktor angebrachten Trägermaterial («Biofilter») mit einer grossen Oberfläche aufwächst und dort festsitzt. Die inerten, mineralischen oder synthetischen Filtermaterialien weisen Oberflächen von 50 - 200 m²/m³ auf. Bei den statischen Anaerobfiltern unterscheidet man zwischen upflow und downflow-Betrieb. Die Anaerobfilter sind im Vergleich zu den Schlammbettreaktoren aufgrund der festsitzenden Biomasse robuster. Allerdings besteht, speziell beim upflow-Betrieb und/oder bei sehr grosser Oberfläche die Gefahr des Zuwachsens des Filtermaterials. Die Abbauleistungen von statischen Anaerobfiltern sind tendenziell eher etwas tiefer als diejenigen der Schlammbede; es werden nur selten HRT's von weniger als einem Tag erreicht. Bei dynamischen Anaerobfiltern wird das Filtermaterial im Substrat bewegt, was den Kontakt zwischen Biomasse und Substrat intensiviert und zusätzlich zum Festbett ein Schlammbed erzeugt, was entsprechend höhere Abbauleistungen ermöglicht.

6. Beim **Zweistufenprozess** wird die sogenannte Hydrolysestufe, wo die Hydrolyse und eine Versäuerung stattfindet, von der eigentlichen Methanisierung räumlich getrennt. Zweistufenprozesse können interessant sein, wenn Abwässer aus der Lebensmittelindustrie neben gelösten Komponenten auch hohe Anteile an suspendierten Feststoffen enthalten. Die in der Hydrolysestufe gebildeten gelösten niedermolekularen Stoffe können in einem Hochleistungsreaktor (UASB, Filter) methanisiert werden. Bei der Vergärung von festen Abfällen ist der Zweistufenprozess auch ein Zweiphasenprozess, indem die Feststoffe in der Hydrolysestufe verbleiben und die Flüssigkeit über die Methanisierung rezirkuliert wird (vergl. Kapitel zur Vergärung fester Abfälle). Die beiden Stufen des Zweistufenprozesses können separat kontrolliert und gesteuert werden.



Figur 5: Zweistufenprozess.

Zur **Vergärung fester biogener Abfälle** sind meso- und thermophile Einstufenprozesse sowie mesophile Zweistufenprozesse im kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb entwickelt worden. Der Behälter, in welchen die festen Abfälle Systeme zur Vergärung bzw. Hydrolyse eingebracht werden, ist bei kontinuierlich betriebenen Anlagen mehr oder weniger voll durchmischt. Eine Ausscheidung und Rückhaltung von aktiver Biomasse mittels Filtermaterialien oder in Form von Schlammbetten ist im Gegensatz zur Flüssigvergärung nicht möglich. Hingegen wird oft das mit aktiver Bakterienbiomasse angereicherte Presswasser, welches bei der Entwässerung des ausgegorenen Materials entsteht, zur Beimpfung des Frischmaterials verwendet. Prozesse zur Vergärung fester Abfälle werden im entsprechenden Kapitel beschrieben.

Umweltaspekte der Vergärung

Biogas verbrennt zu **Kohlendioxid** (CO_2) und Wasser. CO_2 ist als Treibhausgas bekannt. Das bei der Verbrennung von Biogas freigesetzte CO_2 trägt allerdings insofern nicht zum Treibhauseffekt bei, als es nicht aus fossilen Energieträgern stammt. Heute wachsende Biomasse nimmt für das Wachstum CO_2 aus der Atmosphäre auf und gibt es entweder beim Verrotten (aerober Abbau) oder bei der Verbrennung der anaeroben Abbauprodukte wieder im Kreislauf an die Atmosphäre

ab. (Im Gegensatz dazu wird beim Verbrennen von fossilen Energieträgern plötzlich zusätzliches CO₂ frei, welches vorher seit Jahrtausenden im Erdinneren den biologischen Kreisläufen entzogen war.)

Methan ist ebenfalls ein sehr starkes Treibhausgas: die Wirkung eines CH₄-Moleküls entspricht etwa der Wirkung von 30 CO₂-Molekülen. Von den heute weltweit stark angewachsenen Viehherden und in Reisfeldern freigesetztes Methan trägt wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Es ist daher darauf zu achten, dass beim Betrieb der Biogasanlage möglichst wenig Methan an die Atmosphäre gelangt. Sofern aus gewissen Gründen Ueberschussgas produziert wird, ist eine Abfackelung des Biogases vorzusehen.

Bei der Verbrennung von Biogas entsteht **Schwefeldioxid** (SO₂). Dieses reagiert mit Feuchtigkeit weiter zu schwefliger Säure. Schweflige Säure aus fossilen Brennstoffen ist vorallem in osteuropäischen Ländern Hauptverursacher des sauren Regens. Obwohl der Schwefel im Biogas aus den heutigen natürlichen Kreisläufen stammt und auch wieder dahin zurückgeführt wird, ist eine Entschwefelung des Gases empfehlenswert.

Da das System geschlossen sein muss, sind kaum **Geruchsemissionen** zu erwarten: Sofern der Gärprozess genügend vollständig abläuft, ist das Gärgut beim Austrag weitgehend frei von störenden Gerüchen. Ein gut ausgegorenes Produkt erinnert im Geruch an Walderde. Bei hohen Stickstoffgehalten des Substrats ist allenfalls die Freisetzung von etwas Ammoniak nach dem Austrag aus dem Fermenter möglich.

Bei der Vergärung fester biogener Abfälle wird die Produktion eines Kompostes mit einem Trockenstoffgehalt von rund 50% angestrebt. Da bereits die Ausgangsmaterialien deutlich feuchter sind, und sie sich im Lauf der Vergärung noch weiter verflüssigen, muss am Ende der Vergärung eine fest-flüssig-Trennung vorgenommen werden, bei welcher ein stark organisch und anorganisch belastetes **Presswasser** anfällt. Dieses muss – sofern es nicht zur Mietenbewässerung oder als landwirtschaftlicher Flüssigdünger eingesetzt werden kann - weitergehend behandelt werden. Vor der Einleitung in die Kanalisation sind weitere biologische Schritte (Anaerobfilter, Belüftung) und (allenfalls chemisch unterstützte) Sedimentation oder ähnliche Schritte vorzusehen.

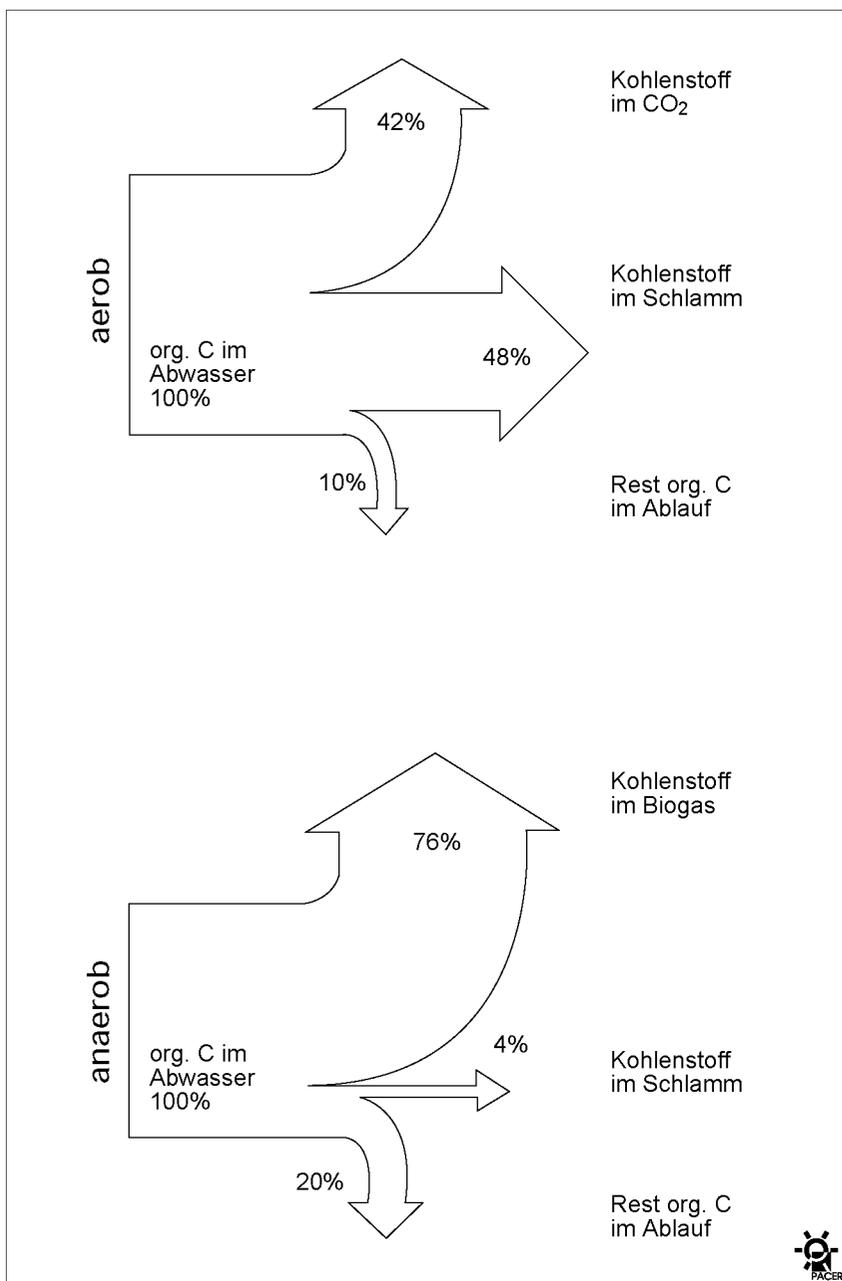
Einsatzmöglichkeiten der Vergärung

Der anaerobe und der aerobe Abbaupfad sind schon oft verglichen worden. Beim **aeroben Abbau** wird der im abgebauten Material vorhandene Kohlenstoff rund zur Hälfte in Bakterienbiomasse eingebaut und zur Hälfte als CO₂ freigesetzt. Die so entstandene Biomasse bezeichnet man bei der Abwasserreinigung als Sekundärschlamm. Bei der aeroben Behandlung geht der Energieinhalt des abgebauten Materials in der Regel vollkommen als Abwärme verloren und es wird viel Fremdenergie gebraucht, um den Sauerstoff in das Substrat einzutragen (die schweizerischen Kläranlagen brauchen jährlich über 300 Mio. kWh zur Belüftung!). Zudem muss die grosse Menge an Sekundärschlamm weiterbehandelt und beseitigt werden.

Beim **anaeroben Abbau** wird viel weniger Biomasse gebildet; nur einige wenige Prozente des Kohlenstoffs finden sich in der Biomasse wieder. Einrichtungen zur Belüftung sind nicht notwendig und das gewonnene Biogas erlaubt, den Prozess energetisch positiv zu gestalten, weil über 90% der im abgebauten Substrat vorhanden gewesenen Energie als energetisch hochwertiges Methan anfällt.

Der aerobe Prozess ist in der Regel sinnvoll, wenn **stark verdünnte Abwässer mit wechselnder Zusammensetzung** vorliegen: aerobe Bakterien passen sich rasch an und können auch bei sehr kleinen Substratkonzentrationen noch aktiv bleiben. Aerobe Prozesse scheinen leichter kontrollierbar und in gewissem Sinn robuster zu sein. Allerdings kann auch mit aeroben Prozessen nicht jedes beliebige organische Substrat abgebaut werden; nicht immer werden die Einleitungsvorschriften in gewünschtem Mass erreicht.

Anaerobe Prozesse eignen sich andererseits speziell für **organisch stark belastete Abwässer**, beispielsweise aus der Lebensmittelindustrie. Bei industriellen Abwässern besteht in der Regel gleichzeitig die Möglichkeit einer sinnvollen Energienutzung des entstehenden Biogases vor Ort. Beim anaeroben Abbau entsteht im Gegensatz zum aeroben Abbau relativ viel Stickstoff in Form von Ammonium/Ammoniak, welcher in gewissen Fällen besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Vor der Entwicklung der Hochleistungsprozesse waren



Figur 6: Beispiele von Kohlenstoffbilanzen bei Belüftung und bei Vergärung eines Abwassers.

dem anaeroben Abbau Grenzen durch die im Vergleich zum aeroben Abbau hohe RT und die damit grossen Reaktoren gesetzt.

Heute erkennt man, dass der **aerobe und der anaerobe Abbauweg sich** primär nicht ausschliessen oder konkurrieren, sondern sich im Gegenteil **sinnvoll ergänzen**. Sowohl für die Behandlung flüssiger wie auch fester Substrate zeichnet sich ein Trend ab, eine anaerobe Behandlung der aeroben (ev. kombiniert mit Nitrifizierung/Denitrifizierung) vorzuschalten und so die Vorteile der beiden Prozesse optimal zu nutzen: hohe Abbauleistung mit minimalen Endkonzentrationen, kleine Schlammproduktion und energetische (wie auch ökonomische) Optimierung der Behandlung.

Die **häuslichen Abwässer** sind normalerweise zu stark verdünnt, um direkt mit konventionellen Gärtechnologien effizient behandelt werden zu können. Heute werden in schweizerischen Kläranlagen jährlich an die 5 Mio. Tonnen Klärschlämme erzeugt, welche zum Teil im Faulturm vergoren werden. Die Restschlämme müssen – wo sie nicht auf das Feld ausgetragen werden können – verbrannt oder auf anderen Wegen entsorgt werden. Hier besteht ein Entwicklungspotential für Gärtechnologien mit besseren Abbaucharakteristiken. Es laufen Arbeiten, die anaeroben Hochleistungsprozesse mit psychrophilen Bakterien ablaufen zu lassen. Man hofft, bald 1-2 kg CSB/m³.d behandeln zu können, was deutlich mehr ist, als bei konventionellen aeroben Belüftungsbecken erreicht wird (0,5-1 kg CSB/m³.d). Solche anaerobe Prozesse würden für Kläranlagen des Jahrs 2000 sehr interessante Perspektiven eröffnen, wie sie bereits weiter oben erwähnt wurden.

Die **festen biogenen Abfälle** aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege können ebenfalls mit Vorteil vergoren werden, sofern sie nicht stark verholzte Anteile aufweisen. Die entsprechenden Technologien werden in einem folgenden Kapitel vorgestellt. Ebenso wird dort die Vergärung von festen biogenen Abfällen der (aeroben) Kompostierung gegenübergestellt. Bei der Vergärung und der Kompostierung entstehen Komposte, welche in der Landwirtschaft zur Kompensation des Humusdefizits und zur Düngung eingesetzt werden können. Voraussetzung für Vergärung oder Kompostierung dieser Abfälle ist die getrennte Einsammlung der Abfälle, wie sie durch die TVA verlangt wird.

Trotz Trennung an der Quelle kann davon ausgegangen werden, dass nicht restlos alles organische Material erfasst wird, d.h. dass im Restmüll noch gärbare Komponenten vorhanden sind. Sofern dieser Restmüll direkt deponiert wird, ist eine Fassung von **Deponiegas** vorzusehen. Durch geeignete konstruktive und betriebliche Massnahmen können Deponien gewissermassen in grosse Bioreaktoren verwandelt werden, wo Biogas kontrolliert abgezogen und verwertet werden kann.

Im Verständnis der mikrobiologischen und biochemischen Prozesse der anaeroben Vergärung wie auch bei der Verfahrenstechnik zur anaeroben Behandlung fester und flüssiger Substrate sind im Verlauf der letzten Jahre beachtliche **Fortschritte** erzielt worden. Der heute erreichte technische Stand der Gärtechnologie ermöglicht zuverlässigere Prozesse mit besseren Abbauleistungen, welche besser an die jeweiligen Substrate angepasst sind. Die Vergärung ist zu einer vorteilhaften Verfahrenswahl geworden, bei welcher der Abbau mit der energetischen Nutzung des Ausgangsmaterials gekoppelt ist und in bester Weise auf die Belange der Umwelt Rücksicht genommen wird. In nächster Zukunft dürfte daher die Vergärung zu einer sehr ernsthaften Konkurrenz für andere Behandlungswege – wie Belüftung, Verbrennung, Deponie oder Kompostierung – werden.

Potentiale an festen biogenen Abfällen und Industrieabwässern

Ziel des vorliegenden Kapitels ist, die anaerob vergärbaren festen Abfälle und Abwässer zu charakterisieren, deren Massenpotential abzuschätzen, sowie, daraus abgeleitet, deren energetisches Potential zu bestimmen. Gleichzeitig soll eine Uebersicht über die bestehenden Anlagen in der Schweiz und in Europa gegeben werden.

Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die anaerobe Gärung erscheint im Vergleich zu andern Abbauwegen besonders geeignet zur Behandlung von feuchten bzw. nassen biogenen Abfällen sowie von organisch stark belasteten Abwässern. Die festen biogenen Abfälle setzen sich zusammen aus Haushaltsabfällen, Industrieabfällen und Abfällen der Landschaftspflege.

Die **Haushaltsabfälle** können in drei Unterkategorien eingeteilt werden:

- Für die Gärung interessant ist die leicht abbaubare, vergärbare Fraktion: Küchenabfälle, Rüstabfälle von Früchten und Gemüsen, Rasen, Haushaltspapier, «weiches» Grüngut, etc.
- Neben dieser gärbaren Fraktion enthalten die Haushaltsabfälle noch eine organische Fraktion, welche kompostierbar, jedoch nicht gärbare ist, nämlich Holz und stark verholzte pflanzliche Abfälle, Eierschalen, Erde aus Blumentöpfen, etc.
- Der verbleibende Rest besteht aus Plastik, Glas, Metall, Steinen, etc. und kann weder kompostiert noch vergoren werden.

Die Haushaltsabfälle enthalten Küchenabfälle. In Tabelle 1 sind Analysenergebnisse von Sortierungen der organischen Fraktion von Hausmüll in der Stadt Genf dargestellt. Die Zusammensetzung der Küchenabfälle variiert allerdings stark in Abhängigkeit von den Jahreszeiten, dem Siedlungstypus, sowie dem sozialen Stand der Einwohner.

Wie bereits erwähnt, können die Haushaltsabfälle auch Grünabfälle aus dem Garten enthalten. Je nach dessen Anteil schwankt der Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) der organischen Hausmüllfraktion zwischen 25 und 30% (eventuell bis 35%). Zwischen 75 und 85% der Trockensubstanz ist organischer Natur (OS).

	(Gewichtsprozente)
Rüstabfälle	27,1
Abfälle von Zitrusfrüchten	18,2
Speisereste	8,8
Verdorbenes Fruchte und Gemüse	9,0
Brot	3,6
Knochen	2,4
Kaffeesatz und Teebeutel	2,8
Excremente von Haustieren, Katzenstreu	2,0
Zimmerpflanzen und Blumen	7,2
Topferde	6,1
Kartongebinde	0,3
Papier	2,2
Nicht trennbar	12,8
Kehrichtsäcke	1,3
Plastiksäcke	1,0
Glas, andere Fremdstoffe	0,2
Total	100,0

Tabelle 1: Ergebnisse einer Sortierung der organischen Hausmüllfraktion in Genf.

Feste Abfälle aus Lebensmittelverarbeitender, chemischer und pharmazeutischer **Industrie** sowie **Gewerbe** fallen in verschiedensten Bereichen an. Beispiele einschlägiger Betriebe können der Tabelle 2 entnommen werden. Abfälle aus Gewerbebetrieben werden zum Teil gemeinsam mit den Haushaltsabfällen, teilweise jedoch separat eingesammelt. Hier fallen relativ grosse Mengen an unverkauften, bzw. verdorbenen Früchten und Gemüsen von Verteilerorganisationen sowie Restaurantabfälle an. Die gärbaren festen Industrieabfälle bestehen aus Nebenprodukten, welche nicht der Tierernährung oder der Kompostierung zugeführt, sondern verbrannt bzw. mehr oder weniger kontrolliert deponiert werden.

Die organisch belasteten **Industrieabwässer** zeichnen sich sehr oft durch starke Schwankungen in der Menge während des Jahres und oft auch während des Tages aus. Speziell grosse Schwankungen sowohl in der Abwassermenge als auch in dessen organischer Belastung werden oft in Kampagnebetrieben beobachtet (z.B. Zuckerfabriken, Brennereien, Gemüseverarbeitung).

Tabelle 2 gibt einige Anhaltspunkte über Abwassermengen und deren organischer Belastung für Abwässer aus verschiedenen Industriebetrieben. (BSB₅: biologischer Sauerstoffbedarf in fünf Tagen = durch aerobe Mikroorganismen während fünf Tagen für den Abbau benötigte Sauerstoffmenge).

 Industriebereich	Abwasservolumen	BSB₅	Einwohneräquivalent
MOLKEREIEN (excl. Kühlwasser)	0,5 - 3,0 m ³ / t Milch	0,5 - 3,0 kg / t Milch	9,0 - 55,0 / t Milch
SCHLACHTHÖFE - Rinder (400 kg Lebendgewicht) - Schweine (100 kg Lebendgewicht) - Geflügel	0,6 - 9,6 m ³ / Tier 0,3 - 0,4 m ³ / Tier 20,0 - 40,0 l/Abschlachtung	2,4 - 10,4 kg / Tier 0,43- 2,1 kg / Tier 6,0 - 30,0 g/Abschlachtung	44,0 -192,0 / Tier 8,0 - 39,0 / Tier 0,1 - 0,5 / Abschlachtung
FISCHVERARBEITUNG	24,0 m ³ / t	41,0 kg / t	76,0 / t
ABDECKEREIEN	0,9 - 1,1 m ³ / t	1,8 - 4,6 kg / t	33,0 - 85,0 / t
BRAUEREIEN	0,4 - 1,2 m ³ / hl Bier	0,4 - 2,7 kg / hl Bier	7,0 - 50,0 / hl Bier
BRENNEREIEN	0,5 - 0,8 m ³ / j	6,0 - 35,0 kg / j	110,0 - 650,0 / j
FRUCHTSAFTERSTELLUNG	—	0,45- 0,9/100 kg Früchte	8,0 - 17,0/100 kg Früchte
SÜSSGETRÄNKE	1,9 m ³ / 1000 Flaschen	1,24 kg / 1000 Flaschen	23,0 / 1000 Flaschen
KONSERVENFABRIKEN - Erbsen - Karotten - Grüne Bohnen - Tomaten - Rote Rüben - Fertigmahlzeiten - Gemischter Salat - Säuglingsnahrung - Erdbeeren - Äpfel - Birnen - Kirschen - Aprikosen	10,0 - 125,0 m ³ } für 1000 7,0 - 23,0 m ³ } Büchsen 3,7 - 5,3 m ³ } zu 1 kg 1,8 - 3,6 m ³ / t 4,5 - 35,0 m ³ / t 30,0 - 50,0 m ³ / t 50,0 - 100,0 m ³ / t 80,0 - 160,0 m ³ / t 30,0 - 40,0 m ³ / t 34,0 m ³ / t 8,0 - 24,0 m ³ / t 4,0 - 10,0 m ³ / t 13,0 m ³ / t	7,0 - 18,0 kg } für 1000 6,0 - 32,0 kg } Büchsen 7,0 - 11,6 kg } zu 1 kg 2,1 - 3,5 kg / t 15,0 - 20,0 kg / t 14,0 - 25,0 kg / t 8,0 - 30,0 kg / t 30,0 - 69,0 kg / t 50,0 - 60,0 kg / t 24,0 kg / t 6,0 - 36,0 kg / t 7,0 kg / t 6,0 kg / t	130,0 - 330,0 } für 1000 110,0 - 590,0 } Büchsen 320,0 - 215,0 } zu 1 kg — — — — — — — — — — —
WEINBAU	1650-1870 m ³ /100 ha Weinberg	280-3530 m ³ /100 ha Weinberg	—
SAUERKRAUTPRODUKTION	5,0 - 9,0 m ³ / t Kraut	4,2 - 9,2 kg / t Kraut	80,0 - 170,0 / t Kraut
HEFEHERSTLLUNG	21,0 m ³ / t Melasse	150,0 kg / t Melasse	2800,0 / t Melasse
KARTOFFELINDUSTRIE - Transport- und Waschwasser - Abdampfanlage - Wasser mit Schalen - Flocken und Gries - Pommes-Chips - Stärkemehl	5,0 - 8,0 m ³ / t 0,2 m ³ / t — 13,0 - 20,0 m ³ / t 16,6 m ³ / t 4,0 - 10,0 m ³ / t	1,0 - 3,0 kg / t 0,9 - 1,8 kg / t 3,0 - 5,0 kg / t 20,0 - 39,0 kg / t 11,3 kg / t 19,0 - 35,0 kg / t	19,9 - 56,0 / t 17,0 - 34,0 / t 56,0 - 93,0 / t 17,0 - 34,0 / t 210,0 / t 350,0 - 650,0 / t
STÄRKEPRODUKTION - Maisstärke - Getreidestärke - Reisstärke	0,4 - 3,0 m ³ / t 8,0 - 12,0 m ³ / t 8,0 - 12,0 m ³ / t	0,8 - 10,8 kg / t 48,5 - 57,0 kg / t 5,4 - 9,2 kg / t	15,0 - 200,0 / t 900,0 - 1060,0 / t 100,0 - 170,0 / t
ZUCKERFABRIKEN	0,5 - 1,0 m ³ / t Zuckerrübe	0,5 - 1,0 kg / t Zuckerrübe	0,5 - 1,0 / t Zuckerrübe
PHARMAINDUSTRIE - Nährlösungen für Bakterienkulturen - Nährböden für Pilze - Waschwasser	120,0 kg/m ³ Bakterienzucht 1,7 m ³ /m ³ Bakterienzucht	4,0 - 8,0 g / l >100,0 g / l 600,0 - 2500,0 mg / l	
GERBEREIEN	1090,0 m ³ / 500 Leder		

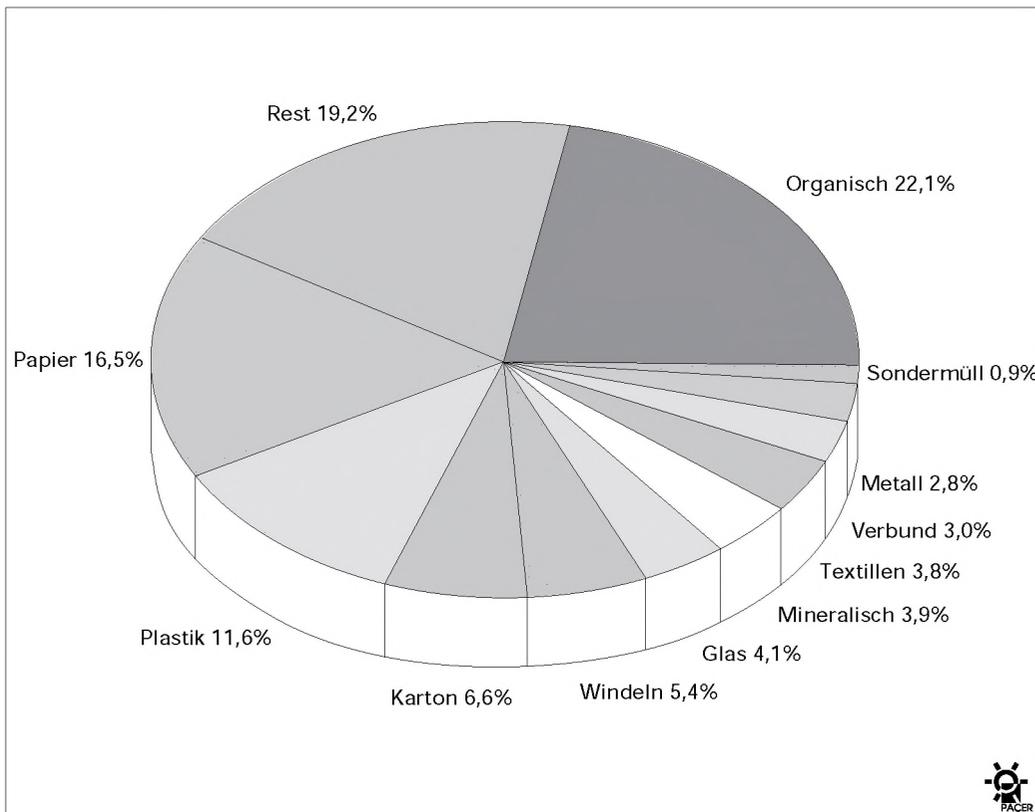
Industriebereich	Abwasservolumen	BSB ₅	Einwohneräquivalent
TEXTILINDUSTRIE			
Rösten von Leinen	40,0 - 60,0 m ³ / t Stroh	1,3 - 3,6 g / l	300,0 / 100,0 kg Lein
Seidenherstellung	70,0 m ³ / t Seide	820,0 - 985,0 mg/t Seide	—
Bleichen von Baumwolle	50,0 - 100,0 m ³ /t Baumw.	—	250,0 - 300,0 / t Baumw.
Waschen von Wolle	100,0 m ³ / t Wolle	1,2 - 22,0 g / l	—
PAPIERINDUSTRIE			
Zellulosebreierzeugung	160,0 - 300,0 m ³ /t Produkt	—	600,0 - 6000,0 / t Produkt
Bleichprozesse	1000,0 m ³ /gebleich. Papierm.	—	3500,0 - 5000,0 / t Papierm.
Papier-, Kartonherstellung	125,0 -2000,0 m ³ /t Papier	3,0 g / l	51,0 - 1254,0 / t Papier
Faserplattenproduktion	5,0 - 50,0 m ³ / t Holz	33,0 - 100,0 kg / t Holz	—

Tabelle 2: Anfall an organischen Reststoffen in verschiedenen Industriebereichen.

Massenpotential der gärbaren festen Abfälle

Das Potential der gärbaren festen biogenen Abfälle wurde durch eine Studie im Auftrag des BEW [arbi/probag, 1991] bestimmt. Figur 7 gibt eine

Übersicht über die verschiedenen Fraktionen der Abfälle, wie sie im Kehrichtsack eingesammelt werden.



Figur 7: Zusammensetzung des Haushalt-Kehrichts (Mittelwerte verschiedener Gemeinden des schweizerischen Mittellandes, probag/arbi 1990).

1988/89 wurden rund 1500 Kehrriechsäcke untersucht. Die in Tabelle 3 dargestellten Daten entstammen Erhebungen in verschiedenen Gemeinden des Kantons Zürich («grauer Sack», d.h. ohne separate Einsammlung) und Schaffhausen («grüner Sack», d.h. bei separater Einsammlung des organischen Anteils). Wenn man die Abfälle – wie oben dargelegt – nach ihrer Gärbarkeit separiert, erhält man folgendes Bild:

• Vergärbare organische Substanzen		27%		810 000 t
• Schlecht gärbare Fraktion			32%	960 000 t
– Schlecht gärbar, kompostierbar	22%			660 000 t
– Rezyclierbares Papier	10%			300 000 t
• Reststoffe			41%	1 230 000 t
TOTAL			100%	3 000 000 t

Tabelle 3: Ungefähre Zusammensetzung des schweizerischen Haushaltabfalls 1990 (Frischgut).

In derselben erwähnten Studie wurden auch Daten über die Industrieabfälle durch Umfragen und Auswerten von statistischen Unterlagen erhoben. Die Resultate sind in Tabelle 4 dargestellt.

Wirtschaftszweige	Abfall (t/a) frisch*	TS (t/a) kompost**	OS (t/a) vergär.***
Gemüseproduktion und -verwertung	50 000	5 000	4 500
Champignonproduktion	500	60	50
Bierbrauereien	20 000	–	–
Obstproduktion und -verwertung	30 000	7 000	5 000
Schlachthofabfälle	30 000	2 000	1 700
Fleischverarbeitung	20 000	–	–
Milchverarbeitung	2 000	3 000	2 000
Getreide- und Oelmöhlen	10 000	1 000	700
Weinherstellung	10 000	10 000	7 000
Papierindustrie	100 000	30 000	10 000
Zuckerindustrie	40 000	10 000	8 000
Kaffee- und Teeverarbeitung	40 000	6 000	5 000
Suppen- und Gewürzproduktion	6 000	2 000	1 500
Diverse Nahrungsmittel (Hefeprod., Bäckereien, etc.)	1 000	3 000	2 500
Andere Abfälle (Leder, Tabak, etc.)	1 200	500	400
Baumwolle, Naturtextilien	2 000	1 600	–
GESAMTTOTAL	363 000	81 000	48 500

Tabelle 4: Das Potential an biogenen, festen Abfällen in der schweizerischen Industrie.

* Nassgewicht der frischen, festen Abfälle.

** Kompostierbare Trockensubstanz inkl. TS des Abwassers.

*** Vergärbare organische Substanz inkl. OS des Abwassers.

Zu den in Tabelle 4 erwähnten Sektoren können noch folgende ergänzende Bemerkungen angebracht werden:

- *Milchverarbeitende Industrie*

Die Abfälle bestehen hauptsächlich aus stark verdünnten Abwässern mit einem Trockensubstanzgehalt im Bereich von 1%; diese Abwässer werden normalerweise in die kommunalen Kläranlagen eingeleitet. Das Milchserum kann zur Produktion von Biogas verwendet werden, sofern es nicht in andere, traditionelle Verwertungswege Einzug findet (Aufzucht von Schweinen, Molkepulver, Herstellung von Getränken). Die milchverarbeitende Industrie produziert wenig feste Abfälle.

- *Gemüseproduktion- und Verarbeitung*

Pro Jahr werden rund eine halbe Million t Gemüse produziert. Dabei entstehen 100 000 t Abfälle, von welchen rund die Hälfte auf den Feldern zurückbleibt. Die Verwertung des Restes (50 000 t/a) ist recht problematisch, weil diese Abfälle sehr oft in die Verbrennungsanlagen geleitet werden. Ein Teil kann allerdings in der Tierzucht Verwendung finden (Abfälle von Karotten, und bis zu einem gewissen Grad: Reste von Erbsen, Tomaten, Endivien, Kartoffeln und Bohnen aus der Konservenindustrie).

- *Schlachthöfe und Fleischverarbeitung*

Jährlich werden in der Schweiz rund eine halbe Million Stück Rindvieh (Rinder, Kühe, Stiere), 3 300 000 Schweine und 200 000 Schafe, Ziegen und Pferde geschlachtet. Schlachthausabfälle können in der Schweinezucht eingesetzt werden; allerdings wird dieser Verwertungsweg durch hygienische und veterinärmedizinische Überlegungen immer mehr eingeschränkt. Panseninhalte der Wiederkäuer haben einen kleinen Nährwert und können daher nicht im grösseren Umfang in der Schweinezucht verwendet werden. Zusätzlich werden grosse, organisch stark belastete Abwasserströme den Kläranlagen zugeleitet.

- *Zuckerindustrie*

Auf 15 000 ha werden jährlich rund 0,85 bis 1 Mio. t Zuckerrüben produziert. Nur $\frac{1}{9}$ des ursprünglichen Gewichtes der Zuckerrübe kann in Kristallzucker umgewandelt werden. Rübenabfälle und Melasse sind in der Tierernährung geschätzt. Das grösste Problem verursachen deshalb die stark belasteten Abwasser der Rübenwäsche und des chemischen Extraktionsprozesses von Rohzucker.

- *Kaffee- und Teeherstellung*

Die Schweiz importiert jährlich 62 000 t Kaffeebohnen, von welchen 6000 t das Land wieder in verarbeiteter Form verlassen. Der Abfall, welcher bei der Herstellung von Kaffee-Extrakt entsteht, ist nicht immer leicht zu beseitigen, obwohl gewisse Nebenprodukte in der Rinderzucht eingesetzt oder kompostiert werden können. Jährlich werden ungefähr 1000 t Tee importiert, welche in Beutel abgefüllt oder aber auch zu Instanttee verarbeitet werden. Die Verwertung der Teeabfälle in der Tierernährung wird nur als eine Uebergangslösung betrachtet, da der Nährwert dieser Nebenprodukte nur demjenigen von schlechtem Heu entspricht.

- *Weinbau*

Die Abfälle, welche bei der Pflege von Rebstöcken anfallen, sind grösstenteils verholzt und können kompostiert werden. Der Traubentrest wird beinahe vollständig für die Herstellung von Trinkalkohol benutzt; die nach Alkoholgärung und Destillation verbleibenden Abfallprodukte können anschliessend vorteilhaft durch Vergärung verwertet werden.

- *Produktion und Verarbeitung von Früchten*

In diesen Sektor gehören eine ganze Reihe von Produkten: Getränke (Fruchtsaft, Alkohol), Essig, Trockenfrüchte, Pektin und Aromastoffe. Obwohl die Produkte landwirtschaftlichen Ursprungs sind, geschieht die Verarbeitung normalerweise in zentraler Weise. Die Abfälle und Abwässer sind oft stark organisch belastet, wie beispielsweise:

- Waschwasser von Früchten vor der Pressung;
- Ausgepresste Fruchthüllen nach der Pressung;
- Filterrückstände bei der Klärung von Most;
- Schlempen und Treber aus der Destillation fermentierter Früchte;
- Nebenprodukte von speziellen Prozessen (Konzentrate, Pektin, etc.);
- Produkte, welche nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen und daher beseitigt werden müssen, etc.

- *Bierbrauereien*

Die Schweiz zählt 35 Brauereien, die im Durchschnitt 120 000 hl Bier pro Betrieb herstellen. Es entsteht dabei Treber, ein fester organischer Abfall, welcher aus den zellulosehaltigen Hülsen des Malzes besteht. Daneben fällt Hefe aus den Filter-Pressen während der Endreinigung des Bieres an. Der Treber enthält viel Stickstoff und Fette; er

ist daher zumindest heute noch in der Tierernährung stark gefragt (vor allem Milchviehhaltung). Andererseits können die Hefen zu Problemen bei deren Beseitigung führen.

– *Papierindustrie*

Es sind generell zwei Prozesse zu unterscheiden: die Herstellung von Zellulosebrei sowie die Produktion von Papier und Karton. In einigen Fabriken sind beide Produktionslinien vorhanden. Die Bleichung der Zellulose erzeugt Abwässer, bei deren Verdunstung Kondensate anfallen. Weitere Abwässer fallen bei der Entfernung von Druckerschwärze aus Recyclingpapier an. Alle diese Abwässer werden normalerweise in Kläranlagen aerob behandelt; die dabei entstehenden Schlämme sind für die Gärung interessant. Gewisse Gärtechnologien erlauben sogar die direkte Behandlung von gewissen Abwässern der Papierindustrie.

Die Abfälle der **Landschaftspflege** beinhalten ein nicht zu vernachlässigendes Potential an gärbaren Substraten, wie dies in der erwähnten Studie von arbi/probag ermittelt wurde. Schnitte von frischem **Gras und Rasen** (aus Garten, Schwimmbädern, Sportplätzen) sind für die Kompostierung nicht erwünscht, da sie zu Geruchsemissionen führen können. 20 000 ha Grünflächen produzieren ungefähr 40 000 t Trockensubstanz pro Jahr. Zusätzlich fallen rund 6000 t TS von Biomasse an, welche an Strassen- und Eisenbahnböschungen gewachsen ist. Teilweise eignen sich diese Substrate auf Grund von Verunreinigungen nicht für die gemeinsame Behandlung mit anderen, «sauberen» Ausgangsstoffen.

Die übermässige Anwendung von Düngern hat zur übermässigen Produktion von **Wasserpflanzen** in unseren Seen und grossen Flüssen geführt. Die Ernte von solcher Biomasse ergibt jährlich rund 3000 t TS. Schliesslich stellt das **Herbstlaub** ein beträchtliches Potential dar: wenn man in Städten etwa – wie für Zürich abgeschätzt – 10 kg/Einwohner und Jahr einsammelt, ergibt die für dies für die gesamte Schweiz rund 20 000 t organische Substanz pro Jahr.

Die folgende Tabelle fasst das Potential an festen biogenen Abfällen aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege zusammen. Zusätzlich zu den gärbaren sind auch die Abfälle aufgelistet, welche ausschliesslich kompostiert werden müssen (verholzte Anteile).

 Quelle	Spezifikation	FS (t/a)	TS (%)	TS (t/a)
Haushalt	vergärbar	810 000	26	211 000
	kompostierbar (Papier, etc., exl. verholzter Gartenabfall)	480 000	40	192 000
	Haushalt total	1 290 000		403 000
Industrie	nahezu 100% kompostierbar; ca. 3/4 vergärbar	363 000	div.	81 000
Landschaftspflege (nass)	Rasen, Herbstlaub, Böschungen, Wasserpflanzen (excl. Holz)	250 000	div.	75 000
Landschaftspflege (trocken)	Schnitte von Bäumen, Sträuchern, verholzte Gartenabfälle	490 000	50	245 000
Rinden	div. Industrien	251 000	60	151 000
TOTAL		2 644 000	36	955 000

Tabelle 5: Schätzung des Potentials der festen biogenen Abfälle in der Schweiz, welche gär- und/oder kompostierbar sind (excl. Klärschlamm und Landwirtschaft).

FS: Frischsubstanz

TS: Trockensubstanz

(Quelle: Edelmann, Engeli; Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft 1992)

Potential der gärbaren Industrieabwässer

Die Mengen und Zusammensetzungen der Industrieabwässer sind nur sehr schwer zu ermitteln, da entsprechende Unterlagen zur Zeit nur bruchstückhaft vorhanden sind.

Als Richtgrößen können die auf Informationen der betreffenden Industriezweige basierenden Angaben in Tabelle 6 betrachtet werden:

– Milchverarbeitung:	1,0	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Papierindustrie:	12,0	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Brauereien:	1,0	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Zuckerindustrie:	0,595	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Schlachthöfe, Fleischverarbeitung:	3,5	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Verarbeitung von Früchten:	0,1	Mio. m ³	Abwasser / Jahr
– Weinbau:	0,245	Mio. m ³	Abwasser / Jahr

Tabelle 6: Schätzung der Abwässermengen von verschiedenen Industriezweigen.

Schon kurzfristig kann das für die EG erstellte Szenario auch für die Schweiz als gültig erachtet werden, nach welchem die Vergärung zur klassischen Abwasserbehandlungsstufe für Industrieabwässer wird. Die aerobe Stufe wird entsprechend nur noch zur Nachreinigung eingesetzt. Die Vergärung und ihre Energieproduktion soll dem Szenario zufolge voll in den Produktionsablauf von industriellen Prozessen integriert werden.

Inventar der in Europa und in der Schweiz bestehenden Anlagen

1982-83 und erneut 1986-88 wurden durch die EG, Abteilung «Wissenschaft, Forschung und Entwicklung» Erhebungen in den EG-Staaten über

landwirtschaftliche, industrielle und kommunale Biogasanlagen durchgeführt. Zusatzinformationen wurden erhoben in Oesterreich, Finnland, Polen und der Schweiz.

In der EG waren 1990 **über 200 Biogasanlagen** mit einem totalen **Reaktorvolumen von über 500 000 m³** zur Vergärung von Industrieabwässern in Betrieb. Am meisten Anlagen wiesen die BRD (47), gefolgt von NL (35) und F (33) auf. 49 Anlagen entfielen auf Brennereien, 39 auf die Zuckerindustrie und 21 auf die Kartoffelverwertung. In insgesamt 23 Industriezweigen kamen anaerobe Prozesse zur Abwasseraufbereitung zum Einsatz. Tabelle 7 fasst Anlagen zur Vergärung von festen Abfällen zusammen und in Tabelle 8 sind die schweizerischen Anlagen zur Abwasservergärung aufgelistet.

 Ort Land	Hersteller	Art der Abfälle Verarbeitungskapazität	Eigenschaften	Inbetriebnahme
LA BUISSE - Frankreich -	VALORGA	Haushaltabfälle 16 000 t / a	1 Fermenter 500 m ³	1984
AMIENS - Frankreich -	VALORGA	Haushaltabfälle + Industrieschlamm 110 000 t / a	3 Fermenter von 2400 m ³	1988
TAMARA'A NUI TAHITI - Frankreich -	VALORGA	Garten- und Haushaltabfälle (70%) 80 000 t / a	2 Fermenter von 2200 m ³	1991
TILBURG - Niederland -	VALORGA / PROTECH	organische Fraktion der Haushaltabfälle 52 000 t / a	2 Fermenter von 3300 m ³	(vorgesehen) 1993
GENT - Belgien -	OWS / DRANCO	organische Fraktion der Haushaltabfälle	Pilotanlage mit 56 m ³	1984
BRECHT - Belgien -	OWS / DRANCO	organische Fraktion der Haushaltabfälle 10 500 t / a	1 Fermenter 808 m ³	1991
ARNHEM - Niederland -	BIOCEL HEIDEMIJ	organische Fraktion der Haushaltabfälle	- Pilotanlage mit 5 m ³ - Pilotanlage mit 60 m ³ - Pilotanlage mit 450 m ³	1988 1990 1992
GARCHING - Deutschland -	BTA	biogene Haushaltabfälle	Pilotanlage	1985
HELSINGØR - Dänemark -	BTA	biogene Haushaltabfälle 20 000 t / a	Stofflöser: 2 x 20 m ³ Hydrolyse: 170 + 125 m ³ Methanisierung 2 x 800 m ³	1991

Ort Land	Hersteller	Art der Abfälle Verarbeitungskapazität	Eigenschaften	Inbetrieb- nahme
GLATTBRUGG - Schweiz -	KOMPOGAS SCHMID / AFAG	Gartenabfälle 970 kg / d	Pilotfermenter mit 15 m ³	1990
RÜMLANG - Schweiz -	KOMPOGAS SCHMID / AFAG	biogene Haushaltabfälle 3300 t / a	1 Fermenter 250 m ³	1992
LULLY - Schweiz -	EREPA SA	landwirtschaftliche- u. organische Abfälle	Pilotanlage 4 x 30 m ³	1992
ROTTWEIL - Deutschland -		Küchen und Gartenabfälle von 4000 bis 5000 Einwohner	Pilotanlage mit 45 m ³	
BREMEN - Deutschland -	RIJKENS A.N. MASCHINEN- BAU	Garten und Küchenabfälle, Abfälle des Bremer Grossmarktes	Hydrolysereaktor: 20 m ³ Methanreaktor Kompostboxen	1987
HILDESHEIM - Deutschland -	ARENHA / F.N. FERNWÄRME- TECHNIK	Klärschlamm: 1 – 2 m ³ / d organ. Haushaltabfälle: 350 kg / d	Pilotfermenter 55 m ³	1989
BELLARIA - Italien -	ITALBA	Klärschlamm und vorsortierter Hausmüll 84 t / d - 74 000 Einwohner	2 Fermenter zu 1700 m ³	1985

Tabelle 7: Anlagen zur Vergärung fester biogener Abfälle.

Industriezweig	Firma	Reaktor- volumen	Hersteller	Inbetrieb- nahme
ZUCKERINDUSTRIE	SUCRERIE ET RAFFINERIE D'AARBERG SA / Aarberg	6500 m ³	SULZER	1985
BIERBRAUEREIEN	BRAUEREI FELDSCHLÖSSCHEN AG Rheinfelden	2 x 400 m ³	SULZER (ESMIL)	1991
FRUCHTSAFHERSTELLUNG	OVA PRODUKTE AG / Affoltern	1200 m ³	PEC (PURAC)	1981
	CIDIS SA / Cossonay	300 m ³	DEGREMONT	1987
KARTOFFELINDUSTRIE	CISAC SA / Cressier	583 m ³	GIST BROCADES (BIOTHANE)	1980
	ZWEIFEL POMY CHIPS AG / Spreitenbach	95 m ³	ALPHA UMWELT- TECHNIK (PAQUES)	1991
	KADI KARTOFFELFLOCKENFABRIK AG / Langenthal	190 m ³	ALPHA UMWELT- TECHNIK (PAQUES)	1991
PAPIERINDUSTRIE	MODEL AG VERPACKUNGEN / Weinfelden	650 m ³	GIST BROCADES (BIOTHANE)	1989
	KARTONFABRIK NIEDERGÖSGEN AG / Niedergösgen	1000 m ³	ALPHA UMWELT- TECHNIK (PAQUES)	1991

Tabelle 8: Schweizerische Anlagen zur Vergärung von Industrieabwässern.

Biogaspotential von festen und flüssigen Reststoffen

Die folgende Tabelle gibt Abschätzungen des Biogaspotentials von verschiedenen festen Abfällen wieder [arbi/probag, 1991]:

Wirtschaftszweige	m ³ /t OS	m ³ Biogas/a
Gemüseproduktion und -verwertung	600	2 700 000
Champignonproduktion	600	30 000
Bierbrauereien	500	–
Obstproduktion und -verwertung	550	2 750 000
Schlachthofabfälle	450	765 000
Fleischverarbeitung	500	–
Milchverarbeitung	600	1 200 000
Getreide- und Oelmöhlen	400	280 000
Weinherstellung	400	2 800 000
Papierindustrie	350	3 500 000
Zuckerindustrie	650	5 200 000
Kaffee- und Teeverarbeitung	600	3 000 000
Suppen- und Gewürzproduktion	400	600 000
Diverse Nahrungsmittel	400	1 000 000
Andere Abfälle (Leder, Tabak, etc.)	450	180 000
Naturtextilien/Baumwolle	–	–
Total:		24 005 000

Tabelle 9: Die potentiellen Gaserträge verschiedener biogener Industrieabfälle.

Wenn man die weiter oben erwähnten Mengen mit den entsprechenden Gasausbeuten multipliziert und für die Industrieabwässer einen groben Schätzwert einsetzt, erhält man ein **theoretisches schweizerisches Biogaspotential** aus festen und flüssigen Abfällen von Haushalt (exkl. Abwasser), Industrie und Landschaftspflege, welches sich auf über 200 Mio.m³ Biogas pro Jahr bzw. **5 - 6 PJ/a** beläuft.

Wenn man bei der Vergärung der **festen Abfälle** abschätzt, welche Anteile in der Praxis unter den verschiedenen lokalen Einschränkungen vergärbar sind und wenn man die Prozessenergie sowie die für den Bau der Anlagen nötige graue Energie in Abzug bringt, verbleibt ein praktisch realisierbares, **nutzbares Energiepotential** von rund 1,2 PJ/a (excl. Industrieabwässer). Unter Berücksichtigung der Einsparungen an Dünger

und Wegfall von Torfransporten aus dem Ausland erhöht sich das Potential auf **1,5 PJ/a**. Nicht berücksichtigt sind die Energieeinsparungen, die durch die anaerobe Gärung im Vergleich zur Kompostierung möglich sind, wo relativ grosse Energiemengen zum Umsetzen des Komposts und teilweise auch zur Belüftung nötig sind.

Das praktisch realisierbare, totale schweizerische Biogaspotential (inkl. kommunale Abwässer und Landwirtschaft) beträgt unter Berücksichtigung der Industrieabwässer über 6 PJ/a [Studie arbi/probag, 1991; ergänzt]. Dies scheint im Vergleich zum schweizerischen Endenergieverbrauch von 1989, der sich auf 779 PJ belief, relativ wenig zu sein (der Verbrauch an Holz betrug beispielsweise 12 PJ/a). Es ist jedoch zu bedenken, dass Biogas ein erneuerbarer, umweltfreundlicher und hochwertiger Energieträger ist. Durch die Vergärung können biogene Substanzen umweltfreundlich aufbereitet werden und in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden. Die Abfallaufbereitung durch anaerobe Technologien bringt daher einen Beitrag an das ökologische Gleichgewicht.

Behandlung von Industrieabwässern

Sinn einer Vorreinigung des Abwassers

Industrielle Abwässer können entweder direkt in die kommunale Kanalisation eingeleitet werden oder aber auf dem Betrieb einer Vorreinigung unterzogen werden. Es können drei Abwasserkategorien unterschieden werden:

- schwach organisch verschmutztes Abwasser,
- stark organisch verschmutztes Abwasser,
- anorganisch verschmutztes Abwasser.

Das schwach organisch verschmutzte Abwasser wird sinnvollerweise der öffentlichen Kanalisation zugeführt und zusammen mit dem häuslichen Abwasser auf der kommunalen Kläranlage gereinigt.

Das stark organisch verschmutzte Abwasser wird heute ebenfalls in den allermeisten Fällen der öffentlichen Kanalisation zugeleitet. Bei dieser Kategorie Abwasser ist aber eine biologische Vorreinigung von Fall zu Fall zu prüfen.

Das anorganisch verschmutzte Abwasser ist in jedem Fall gemäss der Verordnung über Abwassereinleitungen vorzureinigen.

Für die Behandlung des Abwassers über eine anaerobe Abwasservorreinigungsanlage sind nur die stark organisch verschmutzten Abwässer interessant. Die beiden anderen Abwasserkategorien kommen für eine anaerobe Abwasserreinigung nicht in Frage.

Verschiedene **Gründe** sprechen **gegen eine Vorreinigung** des Abwassers auf dem Industriebetrieb, d.h. am Ort des Entstehens: der Anschluss eines Industriebetriebes an die öffentliche Kanalisation ist politisch und rechtlich einfach durchzusetzen und damit auch wesentlich schneller zu erreichen als Planung und Bau einer eigenen Abwasserreinigungsanlage. Um die Abwassersituation in den schweizerischen Gewässern möglichst schnell nachhaltig zu verbessern, war das Einleiten der industriellen Abwässer in die öffentliche Kanalisation sicher der richtige Weg.

Industrielle Abwässer weisen oftmals eine einseitige Zusammensetzung auf. Sie enthalten viel Kohlenstoff, aber wenig Nährstoffe, welche für den biologischen Abbau notwendig sind. Im Gegensatz dazu weist das häusliche Abwasser

einen Ueberschuss an derartigen Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor) auf. Die organische Fracht des Industrieabwassers kann dazu beitragen, dass die Stickstoffelimination (Denitrifikation) auf der kommunalen Kläranlage einfacher und effizienter durchgeführt werden kann. Aus dieser Sicht ergänzen sich die beiden Abwasserarten recht gut. Ist allerdings der industrielle Anteil des Abwassers zu hoch, so kann eine Unterversorgung der für die Abwasserreinigung verantwortlichen Bakterien mit Nährstoffen auftreten. Dies führt zu erheblichen Betriebsproblemen in der ARA.

Die Einleitung von Industrieabwasser in die öffentliche Kanalisation führt dazu, dass – neben den Hochwasserentlastungen – nur eine Einleitstelle in den Vorfluter existiert. Dies erleichtert die Aufgabe der Kontrollbehörden massgebend.

Eine **Vorreinigung** auf dem Betrieb bringt aber auch **grosse Vorteile** mit sich: Da in den seltensten Fällen das Industrieabwasser direkt in einer separaten Leitung der Kläranlage zugeführt wird, besteht die Gefahr, dass bei Regenereignissen ein grosser Teil der Abwasserfracht ungereinigt in den Vorfluter abfließt. Dies führt oftmals zu enormen Stossbelastungen des Vorfluters. Bei einer Vorreinigung des Abwassers am Anfallort kann eine derartige Stossbelastung weitgehend vermieden werden.

Das Industrieabwasser weist oftmals Abwasserinhaltsstoffe auf, die eine hohe Abbaugeschwindigkeit in der biologischen Stufe der Reinigung zeigen. Dadurch verursacht dieses Abwasser Betriebsprobleme in Form von schlecht absetzbarem Schlamm (Blähschlamm). Auch dieses Problem lässt sich durch eine Vorreinigung am Ort des Entstehens beheben.

Wie bereits erwähnt, können Nährstoffprobleme auftreten, wenn das Industrieabwasser auf der Kläranlage dominant wird. Dies bedeutet, dass Nährstoffe zugesetzt werden müssen. Durch die Schwankungen im Abwasseranfall, sowohl bei der Industrie als auch bei häuslichem Abwasser, ist eine gezielte Zugabe von Stickstoff und/oder Phosphor äusserst schwierig. Entsprechend muss überdosiert werden, was mit hohen Betriebskosten bezahlt werden muss und zu unnötigen Umweltbelastungen führen kann.

Stark organisch belastetes Industrieabwasser weist in der Regel am Ort des Entstehens höhere

Temperaturen auf als das häusliche Abwasser. Dies gilt vor allem für die kalte Jahreszeit. Dadurch stehen für die Behandlung dieses Abwassers andere energiesparendere Verfahren zur Verfügung, die gleichzeitig auch eine wesentlich geringere Schlammproduktion zur Folge haben: Anaerobe Abwasserreinigungsanlagen.

Muss die öffentliche Kläranlage auf Nitrifikation ausgebaut werden, so geht die organische Fracht voll in die Bemessung der Belüftungsbecken ein. Dies obwohl im Industrieabwasser oftmals keine massgebenden Stickstoffmengen vorhanden sind. Da die Industrie in diesem Falle kaum zur Kostenbeteiligung herangezogen werden kann, erhöhen sich die Abwassergebühren für die öffentliche Hand überproportional.

Last, but not least ist zu bedenken, dass die Abwässer am Ort des Entstehens noch in konzentrierter Form vorliegen. Die organische Fracht kann in diesem Fall in der Regel mit dem Abwasser angepassten Prozessen viel stärker reduziert werden, als nach einer Verdünnung mit kommunalem Abwasser in der öffentlichen ARA.

Aufgrund der oben aufgelisteten Vor- und Nachteile ist bei jedem Ausbau einer öffentlichen Kläranlage, an welcher Einleiter mit stark organisch verschmutztem Abwasser angeschlossen sind, genau zu prüfen, ob nicht eine Vorreinigung des stark organisch verschmutzten Abwassers am Anfallort aus ökologischen und auch ökonomischen Gründen gefordert werden muss.

Vergleich von anaerober und aerober Abwasservorreinigung

Die Abwasserreinigung auf öffentlichen Kläranlagen erfolgt heute immer mittels einer aerob betriebenen biologischen Stufe. Der Vorteil dieser Technik liegt in der höheren Prozessgeschwindigkeit und ermöglicht deshalb die Abwasserreinigung auch bei tiefen Temperaturen. Der Abbau erfolgt im wesentlichen in einem Schritt durch eine Vielzahl verschiedener Mikroorganismen, welche nebeneinander arbeiten. Die Stoffwechselprodukte sind CO₂ und Wasser, und die frei werdende Energie wird zu einem sehr grossen Teil zum Aufbau von Zellsubstanz verwendet. Dies führt zu einer grossen Produktion von Biomasse, welcher als Klärschlamm entsorgt werden muss.

Die anaerobe Abwasserreinigung weist eine deutlich geringere Prozessgeschwindigkeit auf, was bedeutet, dass das Abwasser temperiert sein muss, um einen Abbau bei vertretbaren Beckenvolumina erreichen zu können. Der Abbau erfolgt stufenweise durch das Zusammenwirken verschiedener Bakteriengruppen und ist deshalb anfälliger auf Störungen. Die Stoffwechselprodukte sind CO₂ und Methan (Biogas) und die frei werdende Energie bleibt hauptsächlich im Methan. Dies bedeutet, dass nur wenig Energie für den Aufbau von Zellsubstanz übrig bleibt; so wird sehr viel weniger Biomasse erzeugt, welche als Klärschlamm entsorgt werden muss.

Sowohl aerobe als auch anaerobe Verfahren basieren darauf, dass möglichst viel aktive Biomasse pro Reaktorvolumen zurückgehalten und mit dem Abwasser in einen intensiven Kontakt gebracht werden kann. Bei beiden Systemen haben sich grundsätzlich zwei **Verfahrenstypen** bewährt:

Erstens das Belebtschlammverfahren, welches darauf beruht, dass der Bakterien Schlamm nach oder in dem Reaktionsbecken durch seine Sedimentationseigenschaften vom Abwasser getrennt und ins Reaktionsbecken zurückgeführt, bzw. dort zurückgehalten wird. Und zweitens: die Festbettreaktoren, welche darauf basieren, dass die Biomasse auf einem Trägermaterial festsetzt und das Abwasser an diesem Trägermaterial vorbeigeführt wird.

Für beide Verfahren sind die verschiedensten Varianten erprobt und technisch ausgeführt worden. Die wichtigsten anaeroben Reaktortypen zur Vergärung von Abwässern sind weiter oben bereits beschrieben worden.

Aus **energetischer Sicht** bestehen **fundamentale Unterschiede** zwischen aeroben und anaeroben Systemen. Aerobe Systeme setzen voraus, dass in der Belüftungstufe jederzeit eine Sauerstoffkonzentration von mindestens 1 mg O₂/l vorhanden ist. Dies führt dazu, dass bei Belebtschlammssystemen und eingetauchten Festbetten Luft eingeblasen werden muss. Bei nicht eingetauchten Systemen muss das Abwasser über den Reaktor gefördert und rezirkuliert werden. In jedem Falle muss eine relativ hohe elektrische Energiemenge für den Betrieb aufgewendet werden. Auf kommunalen Kläranlagen ist denn auch diese Verfahrensstufe der grösste Verbraucher an elektrischer Energie.

Bei anaeroben Systemen ist das Abwasser lediglich in den Reaktor zu fördern und dort umzuwälzen, wobei ein Grossteil der Umwälzung durch die Produktion von Biogas erfolgen kann. Das entstehende Biogas kann als Energieträger eingesetzt werden, sodass netto ein Energiegewinn resultiert. Aus den Tabellen im noch folgenden Kapitel zur Ökonomie lässt sich der energetische Aspekt unschwer ersehen. Im dort genannten Beispiel ergibt sich eine Differenz bezüglich der Energiekosten von netto 250 000 Franken pro Jahr, respektive Fr. $-0.53/m^3$ Abwasser.

Die Kohlenstoffbilanz für ein aerobes und ein anaerobes Biologiesystem wurde bereits in Figur 6 dargestellt. Dort ist ersichtlich, dass beim anaeroben Verfahren nur etwa $1/10$ der **Schlammmenge** anfällt. Da die Entsorgung von Klärschlamm eines der ökologisch und ökonomisch grössten Probleme der Abwasserreinigung ist, kommt dieser Tatsache eine sehr grosse Bedeutung zu. Allerdings ist nicht zu vergessen, dass in gewissen Fällen von speziellen Industrieabwässern bei anaeroben Verfahren die Gefahr bestehen könnte, dass sich (ungelöste) Schadstoffe in der kleineren Schlammmenge stärker akkumulieren könnten als bei aeroben Verfahren. Weil nur wenig anaerobes Schlamm gebildet wird, besteht zudem beim UASB-Prozess die Gefahr, dass sich inerte Partikel im Reaktor ansammeln können, welche das aktive Reaktorvolumen einschränken.

Durch die geringe Biomasseproduktion verringert sich auch die oftmals notwendige Zugabe von **Nährstoffen**. In vielen Fällen ist der Nährstoffbedarf anaerober Abwasservorreinigungsanlagen derart gering, dass – im Gegensatz zu aeroben Verfahren – auf eine Dosierung gänzlich verzichtet werden kann.

Da beim anaeroben Verfahren Biogas erzeugt wird, sind entsprechende Installationen zur **Gaserfassung** und -nutzung vorzunehmen. Aerobe Systeme, die ordnungsgemäss betrieben werden, führen in der Regel zu keinen grossen Geruchsproblemen. Entsprechend sind keine Massnahmen zur Gaserfassung vorgesehen.

Das beim anaeroben Abbau anfallende Biogas wird gespeichert und einer entsprechenden Verwertung zugeführt. Je nach Industriebetrieb erfolgt die Verwertung über ein Blockheizkraftwerk oder zur Substitution von fossilen Energieträgern bei der Wärmeerzeugung. Es ist sicherzu-

stellen, dass das Gas jederzeit abgefackelt werden kann, da Methan – wie bereits erwähnt – ein Treibhausgas ist.

Im Wasser vorliegendes Sulfat und aus dem Eiweissabbau stammende **Schwefelverbindungen** werden in der Anaerobie zu H_2S reduziert. Das anfallende Biogas kann daher bei gewissen industriellen Abwässern eine nicht unbedeutende Konzentration an H_2S aufweisen, welche aus Sicht der Ökologie und zur Schonung der Gasnutzungsapparate eine Entschwefelung als sinnvoll erachten lässt. Hierfür, wie auch für die Elimination von allfällig im behandelten Abwasser verbleibenden Schwefelwasserstoffresten, stehen verschiedene erprobte Verfahren zur Verfügung.

Randprobleme, wie die Gasreinigung, können technisch zufriedenstellend gelöst werden. Dadurch zeigen sich **anaerobe Verfahren** aus ökologischer Sicht gegenüber aeroben Verfahren als **deutlich überlegen**:

- anaerobe Verfahren weisen eine positive Energiebilanz auf, was bedeutet, dass zumindest ab einer gewissen Anlagengrösse mehr Energie erzeugt als für den Prozess benötigt wird. Industriebetriebe können einen Teil ihres Energiebedarfs substituieren. Aerobe Prozesse hingegen bringen einen sehr grossen Fremdenergiebedarf.
- Der Schlammfall ist deutlich geringer, was zu einer Entschärfung bei der Schlamm Entsorgung führt (geringeres notwendiges Deponievolumen, sofern der Schlamm nicht in die Landwirtschaft abgegeben werden kann). Muss der Schlamm entwässert und/oder getrocknet werden, muss entsprechend weniger Energie dafür aufgewendet werden.
- Deutlich weniger oder kein Nährstoffbedarf führt zu einer kleineren Umweltbelastung und ebenfalls zu Energieeinsparungen (Kunstdüngereproduktion).

Voraussetzungen für den Einsatz anaerober Verfahren

Grundsätzlich kann die Technik der anaeroben Abwasserreinigung überall dort eingesetzt werden, wo Abwasser anfällt, das hohe organische Belastungen aufweist. Von Vorteil ist es, wenn das anfallende Abwasser temperiert ist. **Die möglichen Einsatzgebiete der anaeroben**

Abwasserreinigung wurden bereits am Ende des Kapitels über die Verfahrenstechnik der Vergärung und im Kapitel zum Potential umschrieben.

Welche **minimalen Abwasserkonzentrationen** behandelt werden können, hängt ab von Temperatur, Abwasserzusammensetzung (Gehalt an ungelösten Stoffen, etc.) sowie der Konzentration an Nitraten und Sulfaten. Bei sehr kleinen Konzentrationen der abbaubaren organischen Verbindungen und tiefer Abwassertemperatur muss derart viel Energie zur Erwärmung des Ausgangsmaterials aufgewendet werden, dass die Energiebilanz negativ ausfällt. Sofern kein psychrophiler Betrieb möglich ist, ist dann der Einsatz einer anaeroben Abwasserreinigung kaum sinnvoll. Bei optimalen Randbedingungen können Anaerobie-Anlagen ab Abwasserkonzentrationen von rund 300 mg BSB₅ respektive 500 mg CSB/l interessant sein. Gegen oben sind den Abwasserkonzentrationen grundsätzlich keine Grenzen gesetzt.

Industrielle Abwässer können hohe **Salzkonzentrationen** aufweisen: Nitrate und Sulfate, welche Sauerstoff enthalten, erlauben die Existenz von Bakterien, welche diese Verbindungen reduzieren; diese können allenfalls die anaeroben Bakterien konkurrenzieren und im Extremfall teilweise verdrängen. Bei verschiedenen Abwässern (Zuckerfabriken, Papierindustrie, etc.) besteht zudem die Möglichkeit der Ausfällung anorganischer Salze. Im Vordergrund steht das Ausfällen von Kalk (CaCO₃) und/oder Gips (CaSO₄). Besteht diese Gefahr, so ist bei der Projektierung zu untersuchen, ob eine Möglichkeit zur Abscheidung besteht.

Gewisse **hemmende Stoffe** können bereits in geringen Konzentrationen zu Betriebsstörungen führen. Allerdings sind toxische Stoffkonzentrationen (beispielsweise von Schwermetallen) bei Abwässern der Lebensmittelverarbeitenden Industrie nicht zu erwarten. Eine starke Belastung mit Fetten kann bei gewissen Reaktortypen zu Störungen führen. Gewisse Chemikalien, insbesondere einige Lösungsmittel und Desinfektionsmittel, können den Gärprozess negativ beeinflussen. Es ist in diesem Zusammenhang jedoch mit Nachdruck zu betonen, dass sehr viele, für aerobe Bakterien toxische Substanzen von anaeroben Bakterien gut vertragen werden.

Stellvertretend werden nachfolgend drei Anlagen zur Vergärung von Industrieabwässern, die in der Schweiz realisiert wurden, vorgestellt.

Beispiel 1: Kartonfabrik Niedergösgen

Die Kartonfabrik Niedergösgen leitete ihr Abwasser seit Bestehen der Kläranlage in die ARA Schönenwerd. Seit Inbetriebnahme der Anlage wies diese grosse Probleme betrieblicher Art auf: die Anlage war sowohl organisch wie auch schlammmächtig stark überlastet. Aus diesem Grunde wurde anfangs der 80er Jahre ein Ingenieurbüro beauftragt, den Ausbau der Schlammbehandlungsanlage zu studieren. Das Projekt zeigte hohe Kostenfolgen, an welchen sich alle Beteiligten, also auch die Kartonfabrik, zu beteiligen hatten. Aus diesem Grunde wurde nach Alternativen gesucht, welche kostengünstiger waren.

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieur der Gemeinde erstellte die Kartonfabrik eine Variantenstudie, bei welcher folgende Alternativen untersucht wurden:

- Ableiten des unbehandelten Abwassers in die ARA;
- Ableiten des biologisch vorgereinigten Abwassers in die ARA;
- Vollreinigen des Kartonabwassers und Ableiten in den Vorfluter.

Die Studie zeigte, dass die Varianten Vorreinigung und Vollreinigung nahezu gleiche Kosten aufweisen. Die Variante der Ableitung des nicht vorgereinigten Abwassers war deutlich schlechter. Es wurde entschieden, auf dem Areal der Kartonfabrik eine Vorreinigungsanlage zu erstellen. Variantenvergleiche zwischen aeroben und anaeroben Systemen ergaben **deutliche Vorteile für ein anaerobes Verfahren**. Das Fließbild in Figur 8 gibt einen Verfahrensbeschrieb:

Das Abwasser der Kartonfabrik durchfließt zuerst ein bereits früher bestehendes **Absetzbecken**. Rund 75% des dort eingeleiteten Wassers wird von der Kartonfabrik rezirkuliert und in den Prozess zurückgeführt. Die restlichen 25% gelangen in die biologische Abwasservorreinigung.

Das Abwasser hat eine Temperatur, die sich im Bereich von 32-37° C bewegt. Es befindet sich also im idealen Bereich der mesophilen anaeroben Abwasserreinigung. Es wird zuerst in ein **Pufferbecken** geführt, in welchem ein Mengen- und Konzentrationsaustausch erfolgt. Von diesem

Becken wird das Abwasser in den Methanreaktor, der als **UASB-Reaktor** ausgebildet ist, gefördert. Nach dem UASB-Reaktor gelangt das Abwasser in ein **Belüftungsbecken**. In diesem Becken wird das Abwasser von H_2S befreit und in einen aeroben Zustand gebracht. Das Abwasser kann nun dem bestehenden Kanalisationssystem übergeben werden.

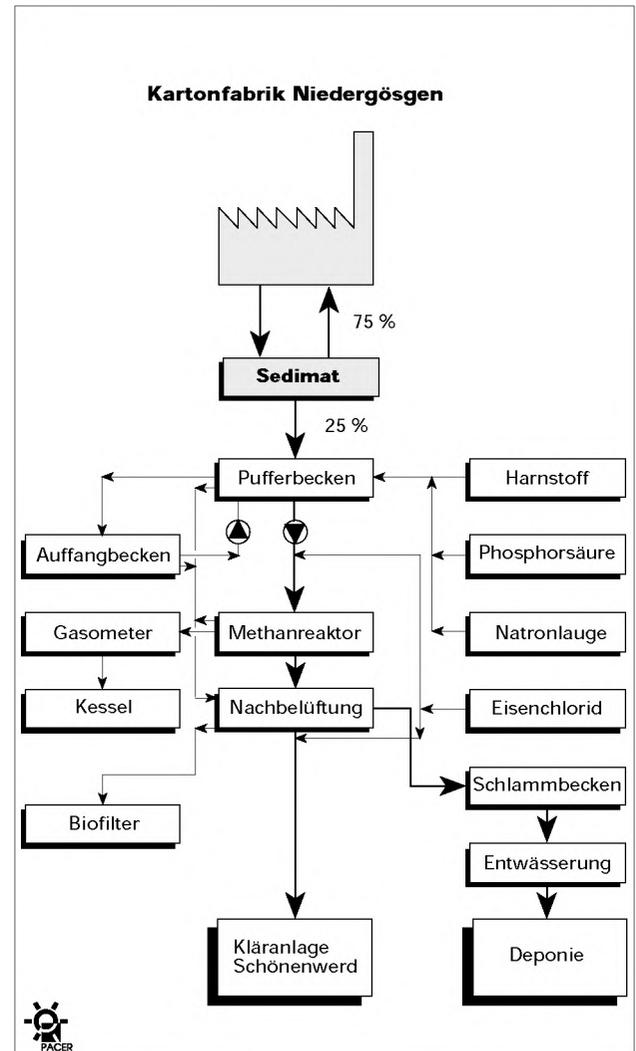
Das **Gas**, das im Methanreaktor entsteht und aufgefangen wird, gelangt in einen Gasometer und wird über einen separaten Kessel, der der Dampfproduktion dient, verbrannt. Der **Schlamm** wird gestapelt und kann im Bedarfsfalle entwässert und verbrannt oder deponiert werden. Sämtliche Becken sind abgedeckt und zwangsentlüftet. Die **Abluft** wird über einen Biofilter gereinigt und der Atmosphäre übergeben.

Im Falle eines wesentlich erhöhten Abwasseranfalles ist dem Pufferbecken ein **Auffangbecken** nachgeschaltet, welches analog einem Regenauffangbecken die überschüssigen Wassermengen aufnehmen kann. Sinkt der Wasserspiegel im Pufferbecken, so wird das Auffangbecken wieder geleert.

Da das Abwasser der Kartonfabrik ein ungünstiges Nährstoffverhältnis aufweist, müssen Harnstoff und Phosphorsäure zudosiert werden. Um notfalls den pH-Wert korrigieren zu können, wurde Zugabe von Natronlauge vorgesehen.

Abwassermenge	6000	m^3/d
CSB total	10000	kg/d
CSB gelöst total	9700	kg/d
BSB ₅ abgesetzt	4500	kg/d
Abwassertemperaturen	30-36	°C
Sulfate (SO_4^{2-})	100	g/m^3
Inhalt Pufferbecken	850	m^3
Inhalt Auffangbecken	1000	m^3
Inhalt Methanreaktoren	1000	m^3
Oberfläche Methanreaktoren	240	m^2
CSB-Abbau	ca.	80%
BSB ₅ -Abbau	ca.	85%
Umwandlung in Biogas	ca.	7 500 kg CSB/d

Tabelle 10: Technische Daten der Anlage Kartonfabrik Niedergösgen.



Figur 8: Fließbild der Anlage Kartonfabrik Niedergösgen.

Beispiel 2: Brauerei Feldschlösschen, Rheinfelden

Die Kläranlage Rheinfelden wird zur Zeit mit zeitweise wesentlich über 100 000 Einwohnergleichwerten belastet. Davon stammt nur ca. $\frac{1}{4}$ von den angeschlossenen Gemeinden.

Eine 1986 durchgeführte Studie zeigte, dass auf einen Ausbau der Abwasserreinigung der Kläranlage verzichtet werden kann, wenn die angeschlossenen Industriebetriebe (4 grössere Betriebe) ihr Abwasser zu mindestens 75% vorreinigen. Aufgrund dieser Studie haben Industrien die Möglichkeit der Frachtreduktion studiert.

Für die Brauerei Feldschlösschen ergaben Variantenstudien, dass längerfristig die Erstellung einer anaeroben Abwasserreinigungsanlage die kostengünstigste Lösung einer Frachtreduktion darstellt.

Die Abwässer der Brauerei Feldschlösschen werden aufgeteilt in einen hochbelasteten Abwasserstrom und in schwachbelastete Abwässer. Die schwachbelasteten Abwässer gelangen – wie bereits früher – über die bestehende Neutralisationsanlage, werden dort soweit notwendig neutralisiert und in die Kläranlage abgeleitet.

Wie das Fließbild in Figur 9 zeigt, werden die hochbelasteten Abwässer gesammelt und einem Pumpensumpf zugeführt. Aus diesem Pumpensumpf werden sie in das Puffer- und Ausgleichsbecken gefördert. Bevor die Abwässer in das Pufferbecken fließen, durchströmen sie zwei Abwassersiebe, welche Grobstoffe aus dem Abwasser entfernen. In diesem Pufferbecken werden sowohl hydraulische, als auch Konzentrationsspitzen ausgeglichen. Eine weitere Pumpstation fördert das Abwasser durch eine Neutralisationsstrecke in das Vorversäuerungsbecken.

Im **Vorversäuerungsbecken** erfolgt ein Anschluss von höher molekularen Abwasserinhaltsstoffen zu niederen organischen Säuren. Das so vorbehandelte Abwasser wird in die UASB-Methanreaktoren gepumpt. In diesen Methanreaktoren erfolgt der eigentliche Abbau der organischen Stoffe in Biogas. Das Abwasser wird vom Biologieschlamm abgetrennt und dem Strang des schwachbelasteten Abwassers zugeführt.

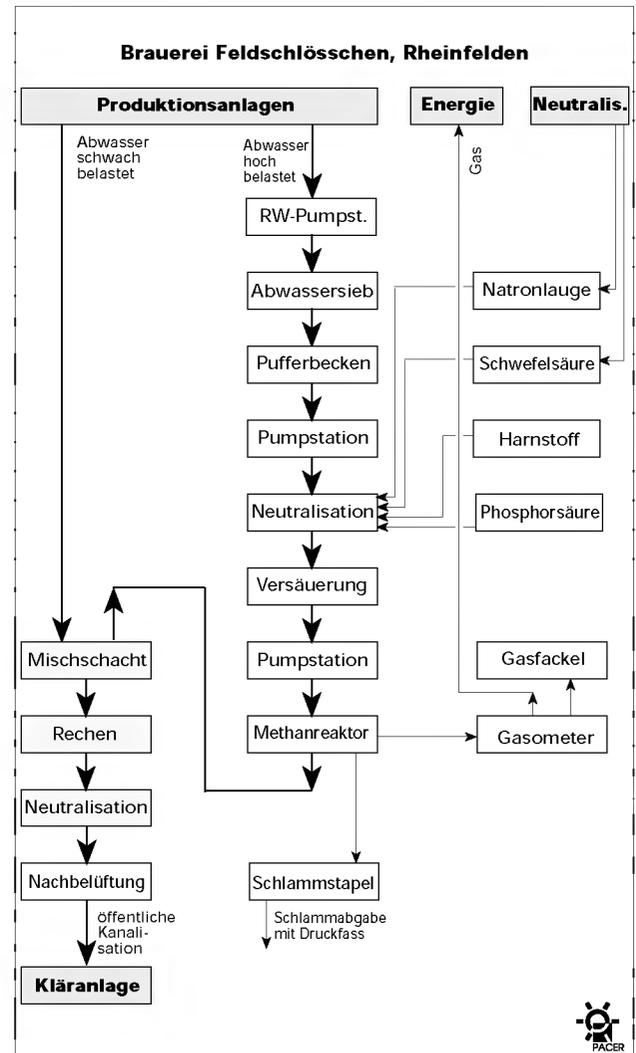
Die Neutralisation der Abwässer erfolgt mit Säure und Lauge ab der bestehenden Neutralisationsanlage. Es wurde die Möglichkeit geschaffen, flüssige und/oder pulverförmige Nährsalze oder Spurenelemente zuzugeben, um so den Gärprozess zu fördern.

Das entstandene Gas wird aufgefangen und in einem Gasometer vor der Nutzung zur Dampferzeugung im Kesselhaus gespeichert. Ist das Kesselhaus nicht in Betrieb und entsteht dennoch Gas, so wird das Gas abgefackelt.

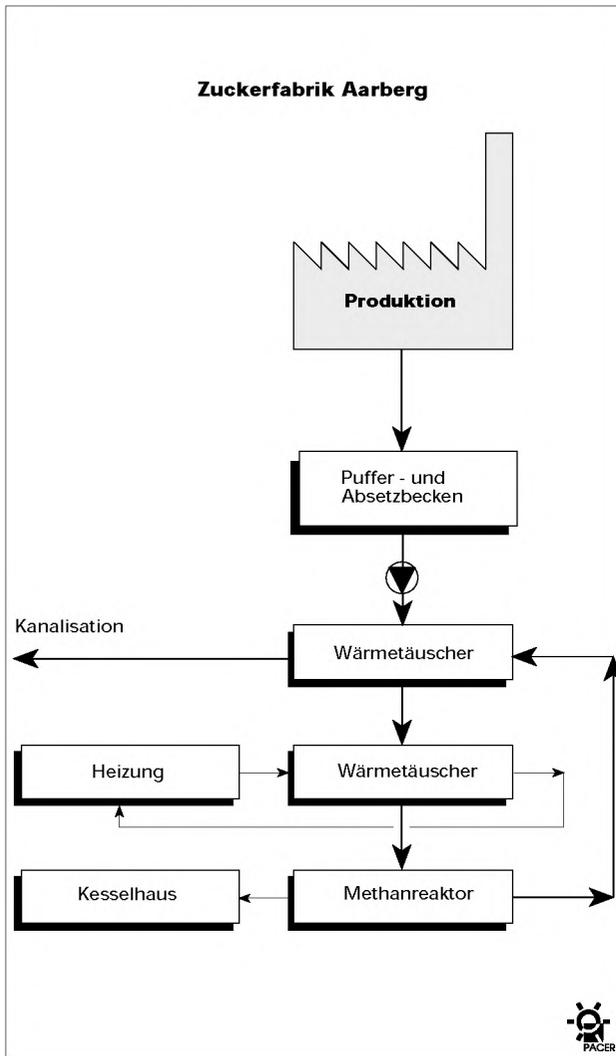
Der beim biologischen Abbau entstehende Schlamm wird mit einer Exzentrerschneckenpumpe aus den Methanreaktoren abgezogen und ins Schlammstapelbecken gefördert. Periodisch wird der Schlamm mittels Tankfahrzeug abgezogen und entsorgt. Alle Becken sind abgedeckt und werden abgesaugt. Die Abluft wird gesammelt und über einen Biofilter gereinigt.

Abwassermenge	2400	m ³ /d
CSB total	6000	kg/d
CSB gelöst total	5000	kg/d
BSB5 abgesetzt	3100	kg/d
Abwassertemperaturen	22-28	°C
Inhalt Pufferbecken	540	m ³
Inhalt Vorversäuerungsbecken	360	m ³
Inhalt Methanreaktoren	800	m ³
Oberfläche Methanreaktoren	130	m ²
Erwarteter CSB-Abbau	> 80	%
Erwarteter BSB5-Abbau	> 85	%
Erwartete Umwandlung in Biogas	> 4500	kg CSB/d

Tabelle 11: Technische Daten der Anlage Feldschlösschen, Rheinfelden.



Figur 9 : Fließbild der Anlage Feldschlösschen, Rheinfelden.



Figur 10: Fließbild der Anlage Zuckerfabrik Aarberg.

Beispiel 3: Zuckerfabrik Aarberg

Das Verfahren ist in Figur 10 schematisch dargestellt: Das Schwemmwasser der Zuckerfabrik Aarberg wird in grosszügig dimensionierten **Absetzbecken** von Grobstoffen befreit. In diesem Absetzbecken erfolgt gleichzeitig eine weitgehende **Vorversäuerung**. Das vorbehandelte Abwasser wird über zwei Wärmetauscher geführt, wobei der erste der Rückgewinnung der Wärme des abfliessenden Abwassers dient, während der zweite die noch fehlende Wärme einbringt.

Das Abwasser wird nun einem **Kontaktschlammreaktor** zugeführt. Die Umwälzung erfolgt zur Hauptsache durch die Biogasproduktion (die aufsteigenden Gasblasen erzeugen Turbulenz). Sie wird unterstützt durch ein Umwälzrührwerk sowie Rührwerke, welche im Bodenbereich des Reaktors installiert sind.

Dem Reaktor nachgeschaltet sind **Sedimentationsbecken**, welche mit Parallelplatten-Abscheidern ausgerüstet sind. Der Schlamm wird in den Reaktor zurückgeführt, während das Abwasser über den Wärmetauscher abfliessen kann und der öffentlichen Kanalisation zugeleitet wird. Die Ueberschuss-Schlammnahme erfolgt am Reaktorboden, wo sich der Schlamm akkumuliert, welcher am meisten mit Kalk durchsetzt ist. Durch diese Massnahme kann eine übermässige Kalkanreicherung im Reaktor verhindert werden. Das anfallende Biogas wird direkt, das heisst ohne Zwischenspeicherung, über einen Kompressor dem Kesselhaus zugeführt.

Die Anlage verarbeitet eine Wassermenge von 100 m³/h bei einer CSB-Konzentration von 9000 mg/l. Die CSB-Abbauleistung liegt bei über 90%.

Behandlung von festen biogenen Abfällen

Die Verfahrenstechnik der Vergärung teilt sich auf in die Schritte Aufbereitung des Substrats, den eigentlichen Gärprozess und die Nachbehandlung.

Aufbereitung der biogenen Abfälle

Eine sorgfältige Aufbereitung der biogenen Abfälle lohnt sich, da die anschliessende Vergärung durch die Aufbereitung stark verbessert wird. Mit der Aufbereitung lassen sich sowohl die Stoffzusammensetzung als auch die Stoffeigenschaften beeinflussen. Zweck der mechanischen Aufbereitung ist es, die anfallenden Bioabfälle zu reinigen, zu zerkleinern und aufzuschliessen, sowie das Volumen zu verringern und die Handhabbarkeit zu verbessern.

Zur Veränderung der **Stoffzusammensetzung** bieten sich folgende Schritte an:

- **Sichtkontrolle:** Entfernung von groben Störstoffen wie Kunststoffen, Glas und nichtmagnetischen Metallen.
- **Magnetabscheidung:** Entfernung von magnetischen Metallen und Metallteilen wie Schrauben und Dosenblech.
- **Ballistische Abscheidung und Windsichtung:** Entfernung von Stoffen, die sich durch obige Methoden nicht entfernen lassen.
- **Siebung:** Erzeugung von Grössefraktionen, welche vom angewendeten Verfahren verarbeitet werden können.

Zur **Änderung der Stoffeigenschaften** stehen folgende Verfahrensschritte zur Verfügung:

- **Zerkleinern:** Vergrössern der spezifischen Oberfläche mittels Hammer oder Schneckenmühle. Dabei hat sich gezeigt, dass langsamlaufende Schneckenmühlen den schnellaufenden Hammern vorzuziehen sind, weil bei den Langsamläufern sowohl die Metallabriebe und in der Folge der zu erwartende Schwermetalleintrag als auch die Betriebskosten durch weniger Verschleiss niedriger ausfallen als bei Schnellläufern. Durch die Arbeitsweise der Schneckenmühle wird das organische Material zerfasert und nicht gehäckselt, woraus eine grössere spezifische Oberfläche resultiert als bei der Aufbereitung durch Shredder.

- **Nasszerkleinern (Auflösen):** Mechanischer Aufschluss in Maschinen (Pulper) wie sie bei der Aufarbeitung von Altpapier Verwendung finden.
- **Anmaischen:** Benetzung der organischen Abfälle durch Prozesswasser, welches bei bestimmten Verfahren in einem Kreislauf geführt wird. Durch die Benetzung des frischen Materials erfolgt gleichzeitig eine Beimpfung durch Mikroorganismen, welche im Rezirkulat enthalten sind.
- **Thermisch-alkalische Vorbehandlung:** Chemisch unterstützter Aufschluss durch Zusatz von Lauge in einem speziellen, heizbaren Reaktor. Allenfalls Injektion von Dampf zur Intensivierung des Aufschlusses.

Durch die Zerfaserung des Ausgangsmaterials wird die Abbauleistung wesentlich beeinflusst. Der anzustrebende Grad der Zerkleinerung wird durch die Ansprüche des angewendeten Gärverfahrens bestimmt, liegt aber in der Regel zwischen 3 und 10 cm. Die gewünschte Grössefraktion wird meistens durch eine Siebung erreicht. Der gewünschte Trockensubstanzgehalt (TS) der organischen Fraktion richtet sich ebenfalls nach dem angewendeten Gärverfahren. Handelt es sich um eine Feststoffvergärung, so liegt der TS-Gehalt in der Regel bei 25% bis 35%, was etwa dem TS-Gehalt von biogenen Haushaltsabfällen entspricht. Im Falle einer Nassvergärung muss während der Vorbehandlung soviel Wasser zugefügt werden, bis ein noch konventionell pumpfähiger Schlamm (TS-Gehalt 12-18%) entsteht.

Vergärung der biogenen Abfälle

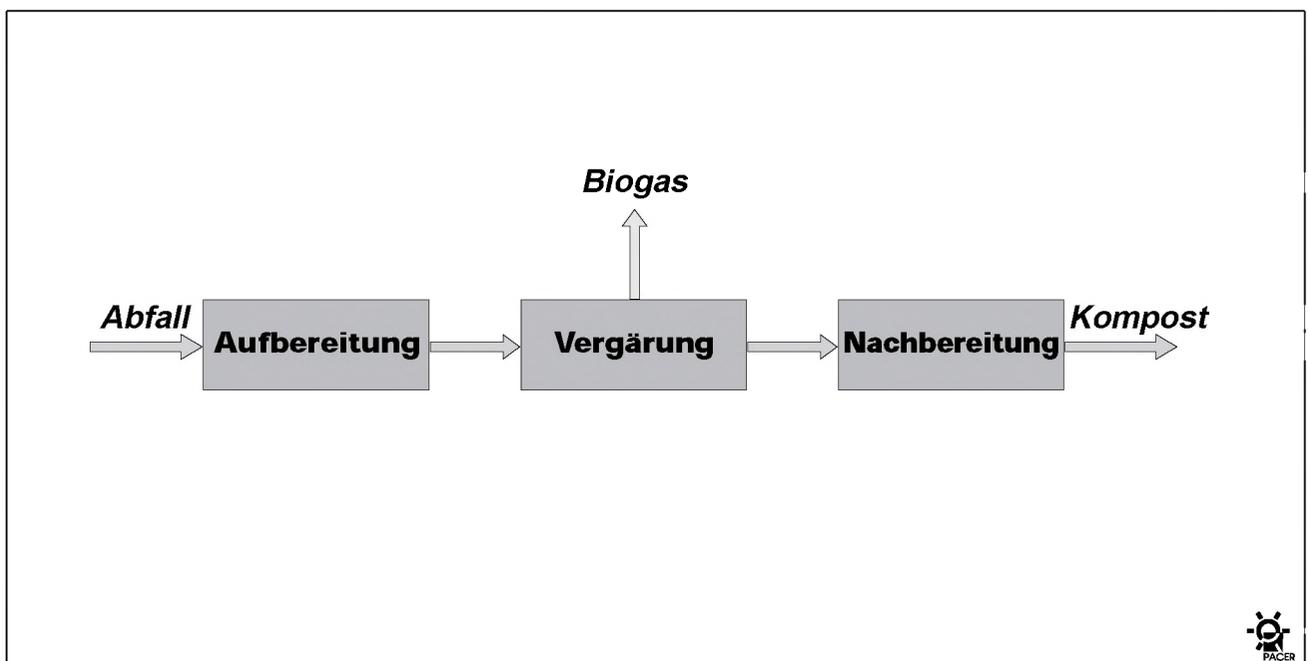
Man unterscheidet zwischen ein- und zweistufigen Verfahren zur Vergärung fester biogener Abfälle. Beim Einstufenprozess laufen Hydrolyse, Säurebildung und Methanisierung in demselben Behälter ab, während bei zweistufigen Prozessen Hydrolyse und Säurebildung von der Methanisierung weitgehend getrennt ablaufen. Als weitere Behandlungsmöglichkeit steht die Co-Vergärung zur Verfügung, bei welcher die festen Abfälle im Faultrum einer Kläranlage zusammen mit dem Schlamm des kommunalen Abwassers vergoren werden.

Die **einstufige Prozessführung** (vergl. Figur 11) zeichnet sich dadurch aus, dass die Hydrolyse der Biopolymere (Zellulose, Hemizellulose, Proteine und Lipide), die Vergärung der entstandenen Oligo- und Monomeren zu organischen Säuren und letztlich auch die Methanogenese gleichzeitig in einem einzigen Reaktor abläuft. Daraus wird klar, dass es nicht möglich ist, einen einstufigen Prozess bezüglich eines einzelnen Abbauschrittes zu optimieren ohne gleichzeitig die Bedingungen für die anderen Schritte zu ändern. Weil jedoch die am Gesamtprozess beteiligten Mikroorganismen einer Fresskette angehören, in der die Abbauprodukte der einen Gruppe jeweils die Substrate der folgenden Gruppe sind und in welcher selbstregulierende Regelkreise den Prozess weitgehend automatisch optimieren, führt eine apparative Trennung des Prozesses in Teilschritte nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der Leistung.

Einstufenprozesse lassen sich sowohl satzweise (batch) als auch kontinuierlich betreiben. Die bekannten einstufigen Feststoffgäranlagen werden in unseren Breitengraden praktisch ausschliesslich kontinuierlich betrieben. Einstufige Verfahren haben den Vorteil, dass sich relativ wenig aufwendige verfahrenstechnische Mög-

lichkeiten eröffnen. Allerdings kann infolge des hohen Feststoffanteils unter Umständen - speziell bei ungenügender Durchmischung - die Kinetik des Abbaus und auch der Abbaugrad beeinträchtigt werden. Aus Sicht der Hygiene und einer gleichmässigen Behandlung des Substrats ist ein Pfropfstrombetrieb ideal, wo sich das Material ohne Durchmischung in Flussrichtung vom Eingang zum Ausgang bewegt. Um die Bildung von lokalen Gradienten zu verhindern und um das frische Substrat möglichst gut zu beimpfen, werden die Reaktoren jedoch mehr oder weniger vollständig durchmischt - mit dem Nachteil, dass die Verteilung der Aufenthaltszeiten für die einzelnen Substrateilchen uneinheitlich wird und dass damit zum Teil unausgeglichenes Material ausgetragen wird. (Dies hat u.a. auch einen negativen Einfluss auf das Abtöten von pathogenen Keimen und Unkrautsamen.)

Einstufenprozesse wurden sowohl im mesophilen, als auch im thermophilen Temperaturbereich realisiert. Die thermophile Fahrweise wirkt sich positiv auf die Hygienisierung aus. Einstufenprozesse werden für Substrate von bis zu 40% Trockensubstanz eingesetzt. Bei sehr hohen Trockensubstanzgehalten besteht jedoch die Gefahr von



Figur 11: Fließbild des Einstufenprozesses.

Hemmungen und von Behinderung der Stofftransporte im Fermenter. Im Einstufenprozess kann im mesophilen Temperaturbereich mit 3-4 Wochen, bzw. im thermophilen Bereich mit 2-3 Wochen Abbauzeit gerechnet werden.

In der Folge werden einige einstufige Verfahren vorgestellt:

– **DRANCO**

ist ein belgisches thermophiles Verfahren («DRy ANAerobic COmposting»). Der Fermenter besteht aus einem stehenden Zylinder, wo das Frischmaterial oben zugegeben und unten ausgetragen wird. Die Durchmischung des Fermenters erfolgt durch Umwälzen über eine externe Schlaufe; der Fermenter wird praktisch voll durchmischt betrieben. Das Frischmaterial wird unter das in Gärung stehende, rezirkulierte Material gemischt und so angeimpft.

– **KOMPOGAS**

ist ein schweizerisches thermophiles Verfahren. Der lange zylindrische Behälter ist (u.U. unterflur) liegend angeordnet. Die Durchmischung erfolgt senkrecht zur Fließrichtung über ein mechanisches Rührwerk (horizontale Welle mit Auslegern).

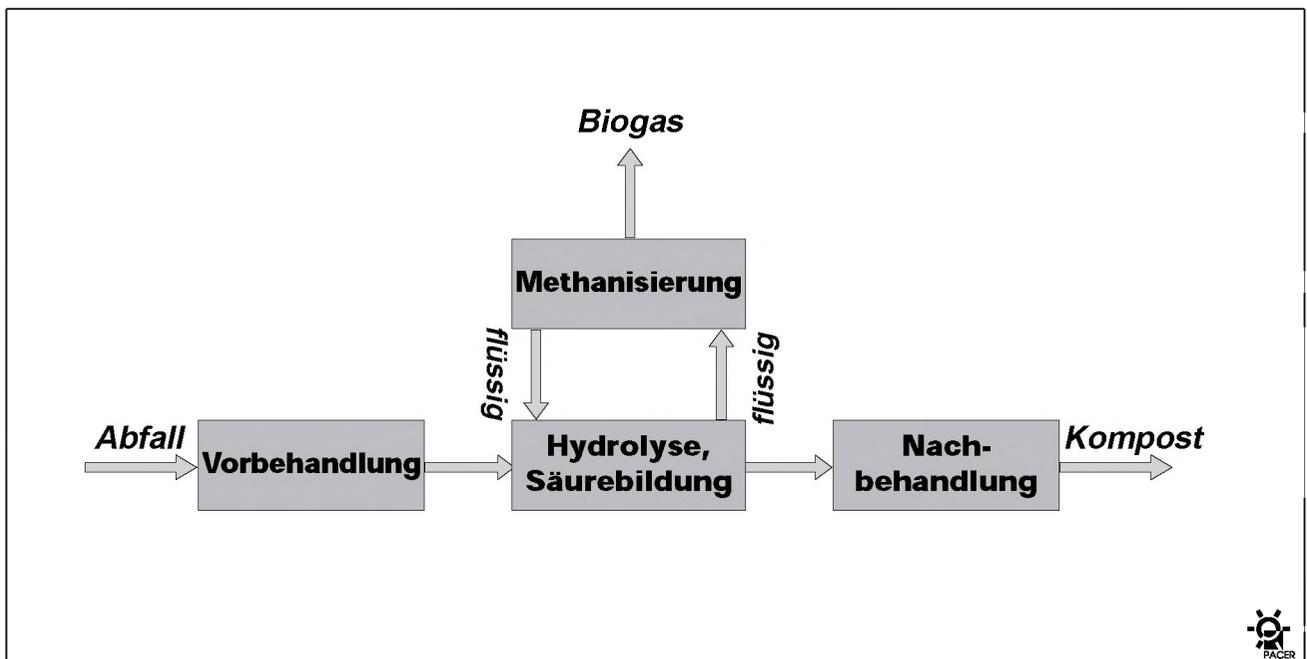
Zur Beimpfung wird ein kleiner Teil des vergorenen Materials unter das Frischmaterial gemischt. Dieser Prozess weist wohl das beste Pfropfstromverhalten der bekannten Einstufenprozesse auf.

– **VALORGA**

ist ein französisches mesophiles Verfahren. Der zylindrische Behälter ist stehend angeordnet. Die vollständige Durchmischung erfolgt durch Einpressen von Biogas. Dank der vollständigen Durchmischung ist keine Impfung nötig.

Die **zweistufige Prozessführung** zeichnet sich dadurch aus, dass die Hydrolyse und Säurebildung räumlich weitgehend getrennt von der nachfolgenden Methanisierung abläuft. Der Hauptanteil an Biogas wird daher in der Methanisierungsstufe gebildet. Im Falle der Feststoffvergärung findet bei einer zweistufigen Prozessführung gleichzeitig eine Trennung in eine feste und in eine flüssige Phase statt.

In diesem Zweiphasenprozess (vergl. Figur 12) durchströmt (bzw. perkoliert) eine mobile flüssige Phase eine stationäre feste Phase. Die ersten Abbauschritte, also Hydrolyse und Säurebildung, geschehen vor allem in der festen stationären



Figur 12: Fließbild des Zweistufenprozesses.

Phase der ersten Stufe. Die mobile flüssige Phase wird in der Folge mit organischen Säuren beladen, welche in der zweiten Stufe, einem anaeroben Hochleistungsreaktor, über verschiedene Wege in Methan und Kohlendioxid umgewandelt werden. Die somit von ihrer organischen Fracht befreite Prozessflüssigkeit durchströmt nun erneut die feste Phase (Rezirkulation) und belädt sich wieder mit den löslichen Abbauprodukten der ersten Stufe. Die Rezirkulation der flüssigen Phase hat den Vorteil, dass – anders als bei konventionellen Nassverfahren – trotz Vergärung in flüssiger Phase nicht ständig neu hinzugefügtes Wasser erwärmt werden muss.

Der Zweistufenprozess bedarf einer Trennung der festen von der flüssigen Phase: die fest/flüssig Trennung erfolgt bei den zur Zeit bekannten Verfahren mit Hilfe von Schneckenpressen, Dekanterzentrifugen oder im einfachsten Fall durch ein Sieb mit geeigneter Maschenweite. Dadurch wird erreicht, dass die Flüssigphase in einem Hochleistungsmethanreaktor (siehe Kapitel über die Verfahrenstechnik) methanisiert werden kann. Zur Methanisierung des Rezirkulates kann somit ein Verfahren angewendet werden, welches seit langem mit Erfolg zur Reinigung hochbelasteter Industrieabwässer eingesetzt wird.

Die Hydrolyse der Feststoffe (feste Phase, erste Stufe) kann sowohl batchweise als auch kontinuierlich betrieben werden, während die Methanisierung in den erwähnten Hochleistungssystemen ausschliesslich kontinuierlich im Kreislauf betrieben werden muss. Ein Vorteil der diskontinuierlichen Hydrolyse liegt im geringeren verfahrenstechnischen Aufwand, weil auf kontinuierlich arbeitende Beschickungs- und Entnahmeeinrichtungen verzichtet werden kann. Dank der Rezirkulation des Flüssigkeitsstroms sind relativ einfache Möglichkeiten für die Erwärmung der Feststoffe gegeben.

Der Vorteil des Zweistufenprozesses liegt in der kurzen Abbaupzeit der festen Stoffe innerhalb weniger Tage. Zudem wirken sich die Bedingungen in der Hydrolysestufe positiv auf die Abtötung von Unkrautsamen aus. Nachteilig ist der höhere apparative Aufwand. Folgende Zweistufenprozesse sind im Einsatz:

– AN

ist ein deutscher, mesophiler Zweistufenprozess mit diskontinuierlicher Hydrolyse. Die Feststoffe

werden durch den Flüssigkeitsstrom über eine Höhe von rund 2,2 m perkoliert. Dem Vorteil des sehr einfachen Aufbaus steht der Nachteil der Möglichkeit von Kanalbildungen in den Hydrolysebehältern gegenüber.

– BTA

ist ein deutscher, mesophiler Zweistufenprozess mit kontinuierlicher Hydrolyse. Zum Anlagenkonzept gehört ein Stofflöser (Pulper), in welchem die Abfälle von Störstoffen getrennt und angemaischt werden. Es kann eine thermophile, alkalische Vorbehandlung vorgeschaltet werden. Die Abbaupzeit für die Feststoffe ist dank eines relativ grossen apparativen Aufwands extrem kurz und liegt im Bereich von nur 3 – 4 Tagen.

Unter dem Begriff «**Co-Vergärung**» versteht man die gemeinsame Vergärung von Klärschlamm einer kommunalen (oder industriellen) Abwasserreinigungsanlage (ARA) und von biogenen Abfallstoffen. Die in der ARA vergorenen Schlämme weisen in der Regel einen tiefen TS-Gehalt von nur einigen wenigen Prozenten auf. Durch die Zugabe von abbaubaren organischen Feststoffen bis zu einem TS-Gehalt des Schlamms von etwa 12% wird die Gasproduktion des Fermenters deutlich verbessert, ohne dass die hydraulische Belastung des Fermenters übermässig erhöht werden muss. Sofern das ausgegorene Material nicht als Schlamm auf das Feld gebracht werden soll, ist je nach Verwendungszweck eine Entwässerung durch Zentrifuge, Band- oder Filterpresse vorzunehmen.

Die Co-Vergärung hat den grossen Vorteil, dass auf ein – zumindest in der Schweiz – umfassendes Netz von bereits bestehenden ARA's zurückgegriffen werden kann. Nachteilig kann sich die Vermischung mit Klärschlamm auswirken. Leider haftet dem Klärschlamm ein schlechter Ruf an, da in der Vergangenheit mit Schwermetallen belastete Schlämme (v.a. aus industrialisierten Agglomerationen) an die Landwirtschaft abgegeben wurden. Die übermässige Belastung des Produkts mit Schwermetallen sollte durch geeignete Wahl der ARA's ausgeschlossen werden können.

– ITALBA

Eine von der Firma ITALBA (I) geplante Grossanlage der Gemeinde Bellaria (I) steht seit mehreren Jahren mit bestem Erfolg in Betrieb; die biogenen Abfälle werden in einer Trennlinie aus Gesamtmüll aussortiert und zusammen mit den Abwässern von

durchschnittlich 75 000 Einwohnern vergoren. In Kaufbeuren (D) steht eine Aufbereitungsstufe der Firma BTA in Kombination mit kommunalen Faultürmen in Betrieb (2500 t/a; Stofflöser 8 m³). Ähnlich, wie bei der Co-Vergärung, können die festen biogenen Abfälle natürlich auch für sich allein soweit verdünnt werden, dass sie mit einem **konventionellen Verfahren zur Vergärung flüssiger Abfälle** behandelt werden können.

– BVT

Beim österreichischen BVT-Verfahren wird das Substrat im Pulper von Fremdstoffen befreit und angemischt. Nach einer aeroben Vorbehandlung, welche der Hydrolyse/Versäuerung und auch der Aufheizung auf thermophile Temperatur dient, gelangt das Material in den Reaktor. Das vergorene Material wird entweder in flüssiger Form ausgebracht oder über Siebbandpressen eingedickt. Eine Pilotanlage mit einer Behandlungskapazität von 1000 t/a wurde in Frederiksund, DK, 1991 erstellt.

Nachbereitung der vergorenen Abfälle

Das Gärprodukt muss auf jeden Fall **entwässert** werden, da die biogenen Abfälle, welche der Gärung zugeführt werden, recht nass sind und während der Gärung Feststoffe abgebaut werden. Zur – je nach Ausgangsmaterial recht problematischen – Entwässerung kommen neben verschiedenen Pressen auch Zentrifugen zum Einsatz. Anzustreben ist ein Trockensubstanzgehalt von mindestens 40%, da feuchter Kompost schlecht lagerfähig ist.

Der Entwässerung nachgeschaltet sein können Schritte zur weiteren Qualitätsverbesserung, wie Mischung mit Strukturmaterial, Sieben oder Windsichten zur nachträglichen Entfernung von Störstoffen.

Dieser anaerob gewonnene Kompost kann unter Umständen direkt oder in Mischung mit aeroben Komposten in der Landwirtschaft als Grundqualität zu Einsatz gelangen. Sofern jedoch eine höhere Qualität verlangt wird, empfiehlt sich eine Nachkompostierung über eine kurze Zeit von rund zwei Wochen, bei welcher das Material eine Heissrottephase durchläuft.

Kompostierung biogener Abfälle

Der Holzbestandteil Lignin kann von anaeroben Bakterien nicht abgebaut werden. Verholzte Abfälle, wie Rinden, Schnitte von Bäumen und Sträuchern, aber auch gewisse Anteile des Hausmülls, können daher nicht vergoren werden. Für diese Abfälle bietet sich die Kompostierung als biotechnologisches Verfahren an. Die Kompostierung ist daher primär nicht als Konkurrenz zur Vergärung, sondern als sinnvolle Ergänzung zu betrachten. In der Praxis sind nach Möglichkeit kombinierte Verfahren zur Vergärung und zur Kompostierung anzustreben (siehe unten). In der Folge werden einige **Grundbegriffe** der Kompostierung erläutert sowie die wichtigsten **Kompostierverfahren** vorgestellt.

Unter dem Begriff **Kompostierung** oder **Rotte** versteht man die aerobe, d.h. unter Luftzutritt ablaufende Zersetzung von biogenem Material durch verschiedenste Mikroorganismen wie Bakterien und niedere Pilze. Normalerweise kann man zwei – allerdings relativ fließend ineinander übergehende – Phasen der Kompostierung feststellen: In einer ersten Phase, auch **Intensivrotte** genannt, werden die leicht abbaubaren Komponenten, wie sie vor allem etwa in Küchenabfällen oder frischem Gras vorkommen, hauptsächlich durch Bakterien zersetzt. In dieser recht stürmischen Phase ist der Sauerstoffbedarf im biogenen Material, d.h. im Rottekörper hoch und die Temperatur erreicht rasch und beständig hohe Werte von z.T. über 60° C. Innerhalb von relativ kurzer Zeit, im Bereich von einigen Tagen bis zu wenigen Wochen, entsteht ein **Frischkompost**.

In einer zweiten Phase, oft auch **Nachrotte** genannt, werden schwerer abbaubare Verbindungen, insbesondere Lignozellulose und Ligninbestandteile, abgebaut. Lignin ist für Bakterien nicht oder nur schwer abbaubar; während der Nachrotte entwickeln sich neben den Bakterien vor allem niedere Pilze, welche mit ihrem Mycel den Rottekörper durchdringen. Die Wärmeentwicklung und der Sauerstoffbedarf sind infolge des gemächlicheren Wachstums der Mikroorganismen kleiner als in der Intensivrotte. Je nach Prozessbedingungen wird nach rund zwei oder mehr Monaten ein **Reifkompost** erzeugt.

Zur Verbesserung der Rottebedingungen (Auflockerung der Struktur, Verbesserung der Durchlüftung,

Verhinderung von lokalen Gradienten etc.) wird der Kompost normalerweise regelmässig umgeschichtet, bzw. **umgesetzt**. Dies kann mit Pneucladern, mit anderen manuell bedienten Maschinen oder aber vollautomatisch geschehen.

Anlagen zur Kompostierung können offen, überdacht oder voll geschlossen sein: In **offenen Anlagen** wird unter freiem Himmel kompostiert. Nachteilig wirkt sich dabei aus, dass das Rottegut der Witterung ausgesetzt ist; bei nasser Witterung kann der Rottekörper durchnässt werden, sodass bei der Rotte Schwierigkeiten entstehen können. Speziell in diesem Fall, aber auch ganz generell besteht das Problem von Geruchsemissionen.

Bei **überdachten Anlagen** kann der Rotteprozess besser geregelt werden, indem der Wassergehalt des Rottekörpers in den gewünschten Grenzen gehalten werden kann. Diese Regelung reduziert das Geruchsproblem etwas – eliminiert es jedoch nicht, speziell wenn viel leicht abbaubares Material kompostiert wird, welches auch vergoren werden könnte: Leicht abbaubares Material benötigt zum Abbau während der Intensivrotte mehr Sauerstoff, als in den Rottekörper eingebracht werden kann; es bilden sich anaerobe Zonen, wo Gärprozesse mit unangenehm riechenden Produkten ablaufen.

In **voll geschlossenen Anlagen** ist der Rottekörper durch einen Behälter oder durch eine Umhüllung (ev. Halle) vollständig abgeschlossen. Diese Ummantelung des Rotteguts erlaubt die Erfassung der Rottegasen und deren Desodorierung durch einen Biofilter.

Die heute in der Schweiz betriebenen Anlagen sind mehrheitlich offen, allenfalls überdacht. In Zukunft müssen jedoch dort, wo keine Gäranlagen geplant werden, infolge des steigenden Anteils an problematischen Küchenabfällen vermehrt voll geschlossene Anlagen erstellt werden. Verschiedene voll geschlossene Anlagen sind zur Zeit in Planung. Allenfalls sind auch Möglichkeiten denkbar, bei welchen die Intensivrotte voll geschlossen und die Nachrotte offen erfolgt.

Speziell bei überdachten oder geschlossenen Anlagen ist eine **Bewässerung** des Rottekörpers sinnvoll, da infolge der hohen Temperaturen viel Feuchtigkeit verdunstet und die Gefahr besteht, dass das Rottegut austrocknet.

Das Rottegut wird zur besseren Sauerstoffversorgung in modernen Anlagen oft belüftet. Man unterscheidet zwischen Druck- und Saugbelüftung. Bei der **Saugbelüftung** wird Luft am Boden des Rottekörpers abgesogen. Heute scheint sich vermehrt die **Druckbelüftung** durchzusetzen, bei welcher am Boden des Rottekörpers Luft eingepresst wird.

Nachfolgend werden als Beispiele einige Kompostiersysteme beschrieben, welche in der Schweiz entweder bereits häufig eingesetzt werden oder aber mit grosser Wahrscheinlichkeit zum Einsatz kommen werden.

– *Mietenkompostierung:*

Das zerkleinerte Rohmaterial wird mit einem Pneuclader oder Kran zu einem «Haufen» von weniger als einem Meter bis drei Meter Höhe aufgeschichtet. Die Mieten weisen oft einen trapezförmigen oder dreieckigen Querschnitt auf. Die sich meist im Freien befindende Kompostmiete wird in der Regel nach ein paar Tagen oder Wochen umgesetzt und ergibt nach 3 bis 6 Monaten reifen Kompost. Das meist batchweise betriebene Verfahren ist auch für kleine Mengen, wie sie bei der Quartierkompostierung anfallen, geeignet.

– *Boxen- und Reaktorkompostierung:*

Die Boxenkompostierung ist ein batchweises Intensivrotteverfahren in meist entweder vollständig abgeschlossenen oder eingehausten Behältern («Boxen»), welches in ca. ein bis zwei Wochen einen Frischkompost liefert. Das Rottegut wird in den Boxen zwangsbelüftet und im Normalfall regelmässig umgesetzt. Zur Abluftdesodorierung kann ein Biofilter verwendet werden. Da diese Art der Kompostierung doch schon einen etwas höheren technischen Aufwand verlangt, wird sie vor allem im Massstab ab einigen hundert Jahrestonnen eingesetzt.

Als eine Art der Boxenkompostierung kann die Korbkompostierung betrachtet werden: das zu kompostierende Material wird in Körben aus Drahtgeflecht (ohne Zwangsbelüftung) während der Rottedauer normalerweise im Schutz einer Überdachung gelagert; da die Körbe relativ klein sind, kann der Sauerstoff einfach ins Material eintreten, sofern genügend Strukturmaterial vorhanden ist.

– *Kanalrotte:*

Bei der Kanalrotte handelt es sich um ein meist vollständig automatisiertes Verfahren, bei welchem

das Material während des Kompostiervorgangs durch mehrere parallele Kanäle mittels eines automatischen Umsetzers fortbewegt wird. Die Kanalrotte wird normalerweise in vollständig abgeschlossenen Hallen eingesetzt. Das Ausgangsmaterial wird zum Anfang eines der Kanäle, welche mit senkrechten Seitenwänden abgetrennt sind, gebracht. Der Kompostumsetzer besitzt eine stachelbesetzte Walze oder ein Schaufelrad, womit er den Kompost erfasst und über eine Fördereinrichtung hinter sich neu aufschichtet. Der Umsetzer fährt auf Schienen, welche auf den Trennwänden angebracht sind, vom Ende zum Anfang des Kanals; wenn ein Kanal umgesetzt ist, kann der Umsetzer seitlich verschoben werden und einen anderen Kanal bearbeiten. Bei jedem Durchgang bewegt er das Material einige Meter in Richtung des Kanalsausgangs bei gleichzeitiger Durchmischung und Auflockerung.

Da relativ grosse Investitionen getätigt werden müssen, welche sich bei kleinen Anlagen kaum amortisieren lassen, wird die Kanalrotte erst ab einigen tausend Jahrestonnen eingesetzt.

– Wandertafelmiere:

Im Gegensatz zur Kanalrotte ist bei der Wandertafelmiere der Kompost nicht durch Trennwände unterteilt. Das Rottegut bildet eine einzige, grosse Tafel über der gesamten Grundfläche des Kompostplatzes. Der Umsetzer besteht aus einem Schaufelrad, welches an einer frei beweglichen Brücke aufgehängt ist. Die Rottezeit beträgt ähnlich wie bei der Kanalrotte in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, der Höhe des Rottekörpers und anderen Grössen 6 – 12 Wochen. In Tafelmierten ist das Substrat gleichmässig über die gesamte Grundfläche zu einer Höhe von 1,6 – 2,5 m aufgeschichtet. Die Wandertafelmiere kommt – wie die Kanalrotte – normalerweise nur bei Grossanlagen mit mehr als 5000 Jahrestonnen zum Einsatz.

Neben diesen beispielhaft aufgeführten professionellen Verfahren bestehen noch weitere Behandlungswege. Ein Teil der biogenen Abfälle wird auch in Zukunft dezentral verwertet: die **Hausgartenkompostierung** ist überall dort sinnvoll, wo nicht durch das Kompostieren von zuviel Abfällen, welche von zugekauften Nahrungsmitteln stammen, der Garten überdüngt wird. Leider macht auch oft bei der Gartenkompostierung nicht alles Material eine Heissrotte durch, wie sie zur Hygienisierung und zur Abtötung von Unkrautsamen nötig wäre. Der **Quartierkompostierung** sind

Grenzen gesetzt durch Geruchsemissionen, oft fehlende Kontinuität in der Betreuung sowie Schwierigkeiten, den oft nicht Qualitätsnormen entsprechenden Kompost sinnvoll zu vermarkten. Es konnte überdies bei umfangreichen Abfallsortierungen in verschiedenen schweizerischen Gemeinden gezeigt werden, dass bei der Quartierkompostierung deutlich weniger biogene Abfälle getrennt erfasst werden, als bei separater Einsammlung und anschliessender professioneller Kompostierung.

Energieausbeuten von Vergärung und Kompostierung

Beim bakteriellen Abbau von biogenem Material wird Energie frei. Wie bereits mehrmals erläutert worden ist (z.B. in Figur 6), wird bei aeroben Abbau ein grosser Teil des Energieinhalts des Ausgangsmaterials als Abwärme frei, während beim anaeroben Abbau über 90% der Energie des abgebauten Materials noch im Methan vorhanden ist, welches in einem zweiten Schritt gezielt durch Verbrennung genutzt werden kann.

Nach der Studie von arbi/probag des Bundesamts für Energiewirtschaft (BEW) setzt sich das **theoretische Biogaspotential** von nicht landwirtschaftlichen, festen biogenen Abfällen aus jährlich rund 80 Mio. m³ Biogas von Haushaltsabfällen, 24 Mio. m³ von Industrieabfällen und 27 Mio. m³ von Abfällen aus der Landschaftspflege zusammen. Es lässt sich damit ein theoretisches Potential für Biogas aus biogenen Abfällen von Haushalt, Industrie und Landschaftspflege von rund 130 000 000 m³ pro Jahr errechnen (vgl. auch Kapitel über Potential). In Abhängigkeit der Substrate variiert der Methangehalt des Gases recht stark. Der durchschnittliche Methangehalt dürfte zwischen 60 und 65% Methan liegen, was einem Energieinhalt von 21,4 bis 23,3 MJ/m³ entspricht. Brutto könnte somit aus den erwähnten biogenen Abfällen theoretisch rund 3 PJ erneuerbare Energie pro Jahr gewonnen werden.

Die in der Praxis mögliche Freisetzung und Nutzung von Biogas aus festen biogenen Abfällen ist dank günstigen Umständen **recht hoch**:

- die separate Einsammlung von biogenen Abfällen muss in der Schweiz auf Grund der TVA (technischen Verordnung über Abfälle)

flächendeckend eingeführt werden; die Biogasgewinnung ist das am wenigsten teure Verfahren (siehe unten).

- die eingesammelten Abfälle fallen in grösseren Mengen an, was den Bau von ökonomisch interessanten Anlagengrössen erlaubt.
- dank des hohen Trockensubstanzgehalts muss – im Vergleich zur Vergärung flüssiger Substrate – relativ wenig Prozessenergie aufgewendet werden. Die Anlagen liefern pro m³ Gärvolumen relativ viel Gas und weisen einen guten energetischen Erntefaktor auf.
- eine sinnvolle Gasnutzung wird erleichtert, da einerseits auf Entsorgungsbetrieben ganzjährig ein hoher Energiebedarf besteht und andererseits die grossen Gasmengen die Produktion von Elektrizität und Wärme in robusten Wärme-Kraft-Kopplungen erlaubt.

In der BEW-Studie wurde abgeschätzt, dass durch die Vergärung von festen biogenen Abfällen in Zukunft netto rund 1,2 PJ/a erneuerbare Energie an Verbraucher abgegeben werden können. Dazu kommen noch Einsparungen bei Torfimporten und bei der Kunstdüngerherstellung im Bereich von 0,3 PJ/a sowie das bei der Vergärung von Industrieabwässern freigesetzte Biogas. Dieses **praktisch realisierbare Potential** ist damit deutlich grösser als dasjenige der Landwirtschaft, wo wohl sehr viele biogene Abfälle vorhanden sind, welche heute jedoch aus ökonomischen Überlegungen nicht zur Vergärung gelangen.

Das theoretische **Energiepotential der Kompostierung** ist deutlich grösser, als dasjenige der Vergärung, da prinzipiell alle biogenen Abfälle – allerdings unter der Einschränkung der erwähnten Probleme bei leicht abbaubaren Abfällen – kompostierbar sind. In einer weiteren BEW-Studie wurde ermittelt, dass bei der Kompostierung aller biogener Abfälle theoretisch rund 8,5 PJ/a als Abwärme und Wasserdampf freigesetzt würden. In der Praxis vermindert sich die Menge der praktisch nutzbaren Energie allerdings aus verschiedensten Gründen ganz drastisch:

- die Abwärmenutzung ist aus betriebstechnischen Gründen praktisch nur aus der Abluft von voll geschlossenen Anlagen möglich, was das nutzbare Potential bereits sehr stark einschränkt.
- die Kompostwärme ist niederwertig; sie fällt auf einem tiefen Temperaturniveau von maxi-

mal 60° C an. Investitionen in Wärmepumpen sind kaum umgänglich, um praktisch nutzbare Energie zu erhalten.

- für die so gewonnene Wärme sind wahrscheinlich in vielen Fällen nicht genügend Energieabnehmer im Bereich des Kompostwerks vorhanden.

In der Praxis dürfte vom theoretisch sehr grossen Bioenergiepotential durch die Kompostierung höchstens einige 100 TJ/a nutzbar gemacht werden können.

Diese energetischen Überlegungen sprechen – neben anderen Faktoren – für den Einsatz der Vergärung, wo immer die Möglichkeit besteht.

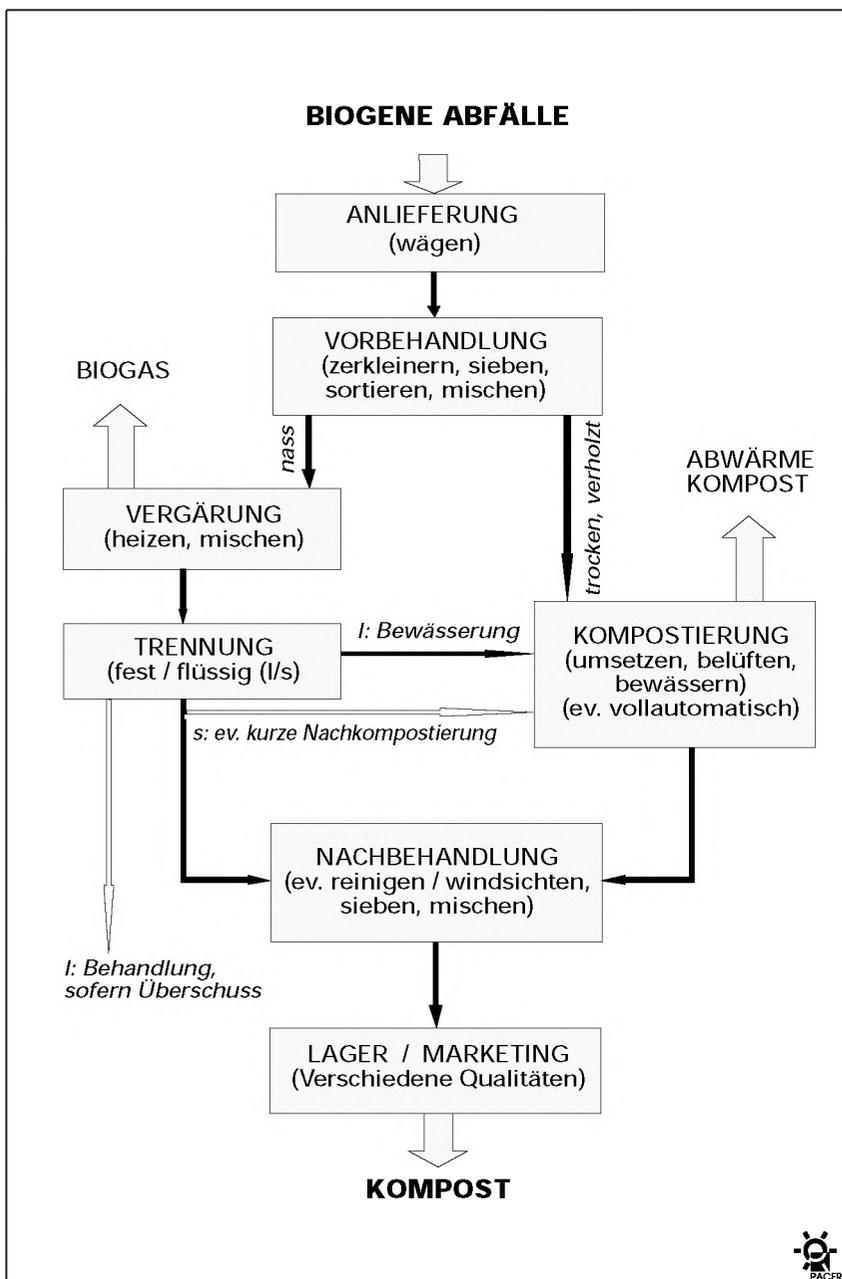
Das Konzept der Kombination von Vergärung und Kompostierung

Nicht alle Abfälle, welche kompostierbar sind, sind auch vergärbar: Ligninhaltige Gartenabfälle, Rinden und gewisse Industrieabfälle eignen sich nicht für die Vergärung und müssen kompostiert werden. Andererseits gibt es Abfälle, wie beispielsweise separat eingesammelter Hausmüll, Rasen und gewisse Industrieabfälle, welche vorzugsweise vergärt werden. Speziell leicht abbaubare, feuchte oder nasse Abfälle ergeben beim Kompostieren Probleme, weil sie zur Bildung von anaeroben Zonen im Inneren der Kompostmieten führen.

Wenn man das in Tabelle 5 dargestellte Potential der biogenen, festen Abfälle der Schweiz betrachtet, fällt auf, dass zwischen einem Drittel und der Hälfte des Potentials vergärbar ist. Man kann davon ausgehen, dass in grösseren Anlagen Abfälle verschiedener Herkunft behandelt werden. Daher scheint es sinnvoll zu sein, kombinierte Anlagen für die beiden Technologien Vergärung und Kompostierung zu bauen. Ein Fliessbild für diese kombinierte Behandlung von organischen Abfällen ist in Figur 13 dargestellt.

Die **Kombination** von Vergärung und Kompostierung hat die folgenden **Vorteile**:

- Nasse, leicht abbaubare Abfälle, wie auch trockenere, holzhaltige Substrate können in der für die jeweiligen Abfälle optimalen Art behandelt werden. Dadurch zeigen die Mieten



Figur 13: Fließbild der Kombination von Vergärung mit Kompostierung.

bei der Kompostierung weniger Neigung zur Kompaktierung und zum Zusammenpappen, was eine Verbesserung der Lüftungsverhältnisse bewirkt.

- Dank der separaten Behandlung der vergärbaren Abfälle (welche zu Geruchsproblemen bei der Kompostierung führen würden) kann es in gewissen Fällen möglich sein, eine billigere Lösung, d.h. eine nicht voll geschlossene Anlage, zur Kompostierung der verbleibenden holzreichen Fraktion zu wählen.
- Die Kosten für Kompostierung und Vergärung sind tiefer für kombinierte Lösungen, als für getrennte Lösungen an zwei verschiedenen Standorten, weil der grösste Teil der mechanischen Einrichtungen für die Vor- und die Nachbehandlung gleichzeitig für beide Technologien verwendet werden kann.
- Professionell betriebene Kompostieranlagen werden – sofern sie nicht total geschlossen sind – in Zukunft zumindest durch eine Ueberdachung abgedeckt, um so den Feuchtigkeitsgehalt der Mieten aktiv steuern zu können. Wegen der Kompostwärme wird in den Mieten sehr viel Wasser verdampft. Dieser Flüssigkeitsverlust muss durch Bewässerung kompensiert werden. Um die Mieten zu bewässern, kann das Presswasser aus der Fest-Flüssig-Trennung der Vergärung benutzt werden.
- Kompostierbares Material, wie Zweige und andere verholzte Substrate, weisen sehr oft einen unausgeglichene Nährstoffgehalt (C/N-Verhältnis) auf. Die Flüssigkeit jedoch, welche während der Vergärung von separat eingesammelten Haushaltabfällen und Industrieabfällen gebildet wird, ist sehr nährstoffreich. Sofern man diese für die Bewässerung der Mieten nutzt, wird dank des dadurch optimierten C/N-Verhältnisses der Kompostierprozess unter Umständen stark verbessert.
- Während der Vergärung wird Biogas produziert, welches in Wärme/Kraft-Kopplungsanlagen in elektrischen Strom und Wärme umgewandelt werden kann. Die enthaltene Energiemenge reicht normalerweise aus, um den Energiebedarf der ganzen kombinierten Anlage, d.h. für Vergärung, Vor- und Nachbehandlung, wie auch für das automatische Umsetzen der Kompostmieten und die Belüftung zu decken. Eine grosse Wärmemenge und – je nach angewandter Technologie und Verhältnis der behandelten Mengen in Vergärung und in Kompostierung – ein Ueberschuss an

Elektrizität kann an dritte Verbraucher abgegeben (verkauft) werden.

- Eine kurze Nachkompostierung des vergorenen Materials von 10 – 14 Tagen verbessert dessen Qualität. Wenn ein Produkt von hoher Qualität produziert werden soll (z.B. für spezielle landwirtschaftliche oder gartenbauliche Anwendungen) ist die Infrastruktur für diese kurze aerobe Nachbehandlung auf einer kombinierten Anlage bereits vorhanden.

Kombinierte Lösungen können nur realisiert werden in Anlagen mit einer bestimmten minimalen **Verarbeitungskapazität**. Aus Kosten-Nutzen-Ueberlegungen heraus ist eine minimale Anlagengrösse für die anaerobe Vergärung wie auch für eine automatisierte Kompostierung nötig. Eine Verarbeitungskapazität von etwa 3500 t/a scheint beim heutigen Entwicklungsstand die minimale Grösse für die Vergärung zu sein (Einheiten, welche durch Kompogas angeboten werden). Je nach Verhältnis von vergärbarem und kompostierbarem Material kann für kombinierte Anlagen minimal mit einer totalen Verarbeitungskapazität von 6000 bis 8000 t/a gerechnet werden (Im Fall der Co-Vergärung sind kleinere Einheiten möglich).

Andererseits ist eine obere Grenze für die Anlagengrösse gegeben durch die Umweltbelastung bei der Einsammlung (Energie, Lärm, Luftverschmutzung) und durch die steigenden Transportkosten: Studien im Auftrag der Stadt Zürich zeigten, dass es unter einer ganzheitlichen, makroökonomischen Betrachtungsweise sinnvoller ist, 2 kleinere Anlagen (Verarbeitungskapazitäten 20 000 t/a und 15 000 t/a) anstelle von 1 Grossanlage (35 000 t/a) zu bauen. Aus Umweltgründen werden in der Schweiz vorderhand keine zentralen Grossanlagen geplant; die optimale Lösung scheint die sogenannte «professionelle, kleinregionale Anlage» zu sein, welche genügend gross ist, um die Abfälle professionell zu behandeln, wo jedoch die Distanzen zwischen Abfallerzeuger und Behandlung klein bleiben.

Energiebilanz von kombinierten Anlagen

Sofern die Anlagen in der unmittelbaren Nachbarschaft zu Wohngebieten oder innerhalb von Agglomerationen gebaut werden (was aus Sicht der Transportdistanzen sinnvoll ist), ist es in den

meisten Fällen notwendig, vollständig geschlossene Anlagen zu bauen. Geruchsemissionen werden dabei verhindert, indem die Abluft durch einen Biofilter geleitet und dadurch desodoriert wird. Diese vollständig geschlossenen Anlagen haben normalerweise einen hohen Energiebedarf für die Belüftung des Kompostes wie auch für das den Kompost umgebende Containment (Halle, etc.). Zur Vorbehandlung des Substrats (Zerkleinerung, Sortierung, etc.) braucht es etwa ebensoviel Energie wie zur Belüftung. Der Energiebedarf zum Umsetzen des Kompostes ist in einer automatisierten Anlage etwa halb so gross wie derjenige zur Belüftung.

Energiebilanzen wurden berechnet für die Kombination einer vollständig geschlossenen Kompostierung a) mit einer mesophilen 2-stufigen Vergärung mit thermischer Vorbehandlung, und b) mit einer thermophilen 1-stufigen Vergärung. Wenn 10 000 t/a vergärt und 10 000 t/a kompostiert werden, kann man mit einer Energieproduktion aus der Vergärung von etwa 4,5 Mio kWh/a rechnen (ca. 2,9 Mio. kWh/a Wärme und 1,6 Mio. kWh/a Elektrizität).

Wenn die Kompostierung mit einem mesophilen Zweistufenprozess kombiniert wird, kann mit einem Wärmeüberschuss von rund 2 Mio. kWh/a gerechnet werden; die Elektrizität wird hingegen vollständig benötigt, um den Prozess zu betreiben. Ein Wärmeüberschuss von 2,6 Mio. kWh/a und Ueberschuss-Elektrizität von 375 000 kWh/a kann bei der Kombination von Kompostierung mit thermophiler 1-stufiger Vergärung erwartet werden.

Der höhere Energiebedarf der 2-stufigen Vergärung wird durch die grössere Zahl von aufwendigeren und energieintensiveren mechanischen Verfahrensschritten bewirkt. Neuerdings scheinen jedoch Lösungen mit einem kleineren Energiebedarf möglich zu sein, was erlauben würde, einen nicht unbedeutenden Anteil der gewonnenen Energie an Dritte abzugeben.

In einer Studie über die Machbarkeit der Nutzung von Kompostabwärme wurde errechnet, dass beim Kompostieren von 10 000 t organischer Abfälle (Trockensubstanz ca. 45%, Energiegehalt = 17,8 MJ pro kg TS) bei einem TS-Abbaugrad von 50% rund 11 Mio. kWh Energie freigesetzt werden in Form von warmer, feuchter Luft. Zurzeit laufen Untersuchungen, wie weit diese Niedertempera-

tur-Abwärme genutzt werden kann. Sofern die Abluft in Wärmetauschern abgekühlt wird, fallen grosse Mengen von Kondenswasser an. In isoliert betriebenen Kompostanlagen kann dieses Wasser zur Mietenbewässerung genutzt werden. In kombinierten Anlagen hingegen scheint es sinnvoller zu sein, das Kondenswasser über die Kanalisation abzuführen und zur Mietenbewässerung das Abwasser aus der Fest-Flüssig-Trennung der Vergärung zu nutzen. Dieses Wasser muss nämlich in isolierten Gäranlagen mit aufwendigen Reinigungsverfahren gereinigt werden, bevor es der Kanalisation übergeben werden kann. In einer ersten im Praxis-Massstab betriebenen Gäranlage in Rümlang/Glattbrugg bei Zürich laufen Versuche, dieses Presswasser in einem pulsierenden Anaerobfilter zu reinigen.

Schlussfolgerungen zur Behandlung von festen biogenen Abfällen

1. Ligninhaltige, strauchige, holzige Abfälle werden mit Vorteil (aerob) kompostiert; nasse, leicht abbaubare organische Abfälle werden mit Vorteil (anaerob) vergärt.
2. Das Potential an kompostierbaren und vergärbaren Abfällen ist vergleichbar (vgl. Tabelle 5).
3. Vergärung und Kompostierung ergänzen sich in den meisten Fällen.
4. Falls beide Verfahren in Kombination am selben Standort realisiert werden, können Abfälle in angepasster Weise verarbeitet werden, wobei die verholzten organischen Bestandteile der Kompostierung zugeführt und die leicht abbaubaren, feuchten Anteile vergärt werden. Die Kombination der Verfahren bringt verschiedene Vorteile.
5. Sowohl die anaerobe, wie auch die aerobe biologische Behandlung von biogenen Abfällen ist technisch machbar und ökologisch sinnvoll (Beitrag an die Kompensation des Humusdefizits, Gewinnung von erneuerbarer Energie, Entlastung von KVA's und Deponien).
6. Für die Behandlung von leicht abbaubaren, feuchten Haushalt- und Industrieabfällen bietet

die anaerobe Gärung gegenüber der Kompostierung ökonomische Vorteile, da einerseits für die Kompostierung ein grösserer Landbedarf besteht, und da andererseits die erwähnten leicht abbaubaren Abfälle unter Beimischung von holzigem Strukturmaterial vorzugsweise in voll geschlossenen, relativ teuren Hallen behandelt werden müssen. Unter Berücksichtigung der Realisation eines Erlöses aus dem Verkauf von Ueberschussenergie vergrössern sich die ökonomischen Vorteile zugunsten der Vergärung noch.

7. Für grössere Anlagen verursacht die kombinierte Verwertung tendenziell niedrigere Kosten als die Kompostierung ohne Vergärung.

Ökonomie der Vergärung

Industrieabwässer

Im Gegensatz zu den festen Abfällen ist die Problemstellung bei den Industrieabwässern von Industriezweig zu Industriezweig enorm unterschiedlich. Aus diesem Grund lässt sich kein allgemein gültiger Kostenvergleich erstellen. Die Kosten einer Anlage für eine Zuckerfabrik lassen sich nicht mit den Kosten einer Anlage für die Papierindustrie vergleichen. Dies gilt auch für andere Aspekte der anaeroben Industrieabwasserreinigung, insbesondere auch für die energetischen Aspekte.

Es werden deshalb hier zwei Beispiele vorgestellt, welche ungefähre Rückschlüsse auf ähnliche Anlagen geben können, da sowohl die Abwassermengen als auch die Abwasserfrachten in Bereichen liegen, die auch für andere Anlagen Gültigkeit haben könnten. Um die angegebenen Kosten richtig beurteilen zu können, sind die entsprechenden Berechnungsvorgaben nachfolgend zusammengefasst.

Investitionskosten

Wie in den meisten anderen Fällen auch, wurden die Beispiele auf Land erstellt, welche dem entsprechenden Industriebetrieb bereits gehörten. Dennoch wurde für den Landbedarf ein **Industrielandpreis** von Fr. 300.-/m² für das benötigte Bauland eingesetzt.

Die Kosten für den **Bauteil** der Anlagen wurden aufgrund der tatsächlichen Abrechnungen eingesetzt. Für die nicht realisierten Varianten wurden aufgrund von Offerten Mehr- und Minderpreise kalkuliert.

Unter der Position **Erschliessung und Umgebung** sind vor allem folgende Investitionskosten eingerechnet:

- Interne Massnahmen zur Abwasserfassung und -zusammenführung.
- Abwasserzuleitung und Anschluss an die Kanalisation.
- Sämtliche Umgebungsarbeiten, inklusive Zufahrt, Plätze, Umzäunung, Begrünung.

Unter **Ausrüstung** sind sämtliche elektro-mechanischen Ausrüstungsteile eingesetzt, welche nicht einem eigentlichen Verschleiss unterliegen (Rohrleitungen, Armaturen, Installationen, elektrische Ausrüstung, etc.). Die Kosten für die Ausrüstung

wurden aufgrund der tatsächlichen Abrechnung eingesetzt. Für die nicht realisierten Varianten wurden aufgrund von Offerten Mehr- und Minderpreise kalkuliert.

Unter **Maschinen** sind sämtliche Ausrüstungsteile eingesetzt, welche natürlicherweise einen Verschleiss aufweisen (Pumpen, Gebläse, Belüfter, etc.). Die Kosten für die Maschinen wurden aufgrund der tatsächlichen Abrechnung eingesetzt. Für die nicht realisierten Varianten wurden aufgrund von Offerten Mehr- und Minderpreise kalkuliert.

Betriebskosten

Die Ermittlung der Abschreibung und Verzinsung des eingesetzten **Kapitals** erfolgt nach der in der Investitionskostenrechnung üblichen Annuitätenmethode. Mit Hilfe eines angenommenen Zinssatzes von 8% und der Nutzungsdauer, konnten die Annuitätsfaktoren nach folgender Formel bestimmt werden:

$$[f] = [(1 + i)^n i] : [1 + i)^n - 1]$$

wobei n die Nutzungsdauer in Jahren und i den Zinssatz bezeichnen.

Gegenstand	Zins (%)	Nutzungsdauer (Jahre)	Faktor (%) [f]
Bauteil, Erschliessung + Umgebung	8	25	0,094
Ausrüstung	8	15	0,117
Maschinen	8	7	0,192

Tabelle 12: Zins, Nutzungsdauer und zugehörige Annuitätsfaktoren.

Die jährlichen Kosten für Reparatur, Wartung und Unterhalt (RWU) des Bauteiles, der Ausrüstung, sowie der Maschinen, wurden durch folgende Sätze, bezogen auf die jeweiligen Investitionskosten, ermittelt:

Gegenstand	RWU-Satz (%)
Bauteil	1
Ausrüstung	2
Maschinen	6

Tabelle 13: RWU-Sätze für Bau und Anlageteil.

Für die elektrische **Energie** wurde ein Mischpreis von 0,20 Fr./kWh eingesetzt, wobei dieser Preis eine Mischung zwischen Hoch- und Niedertarif darstellt und die Kosten für die Spitzenlast beinhaltet. Für den Ersatz von Erdgas durch Biogas wurde ein Preis für das Erdgas von 0,04 Fr./kWh eingesetzt.

Für eine Arbeitskraft sind Jahreskosten von Fr. 110 000.– kalkuliert. Die **Personalkosten** sind als Bruttobetrag einschliesslich sämtlicher Sozialleistungen zu verstehen.

Es wurde für **Versicherungen** ein Satz von 1%, bezogen auf die Gesamtinvestitionskosten eingesetzt. Der Schlamm, der in der Anlage produziert wird, muss entsorgt werden. Es wurde mit **Schlamm Entsorgungskosten** von 0,80 Fr./kg Trockensubstanz gerechnet. Aufgrund des jewei-

ligen gültigen Kostenverteilers wurden die **Restabwasserkosten** berechnet und eingesetzt. In beiden Beispielen wurden für die Berechnung der Restabwasserkosten die Abwassermenge, die organische Belastung sowie die Belastung mit absetzbaren Stoffen berücksichtigt.

Beispiel Kartonfabrik Niedergösgen

Das Verfahren sowie die wichtigsten technischen Daten dieser Anlage sind im Kapitel über die Behandlung von Industrieabwässern beschrieben. Die Anlage wurde ausserhalb des Fabrikareals erstellt, was relativ hohe Kosten bezüglich Abwasserzuleitung und Gasrückführung verursachte. Die Tabelle 14 zeigt die Kosten der drei verschiedenen untersuchten Verfahren sowie die jeweilige Energiesituation, umgerechnet auf Kosten.

 Verfahren	Dim.	anaerobes Belebtschlammssystem	anaerober UASB-Reaktor	anaerober Wirbelbettreaktor
Technische Daten				
Abwassermenge	m ³ /d	6'000	6'000	6'000
CSB-Fracht	m ³ /a	1'500'000	1'500'000	1'500'000
	kg/d	10'000	10'000	10'000
	kg/a	2'500'000	2'500'000	2'500'000
INVESTITIONEN	Fr.	7'700'000	7'750'000	7'100'000
Landerwerb	Fr.	750'000	750'000	750'000
Bauteil	Fr.	1'500'000	2'850'000	1'500'000
Erschliessung/Umgebung	Fr.	250'000	250'000	250'000
Ausrüstung	Fr.	4'500'000	3'500'000	3'900'000
Maschinen	Fr.	700'000	400'000	700'000
JAHRESKOSTEN				
Kapitalkosten	Fr./a	885'400	837'700	815'200
Landerwerb	Fr./a	60'000	60'000	60'000
Bauteil	Fr./a	141'000	267'900	141'000
Erschliessung/Umgebung	Fr./a	23'500	23'500	23'500
Ausrüstung	Fr./a	526'500	409'500	456'300
Maschinen	Fr./a	134'400	76'800	134'400
Wartung und Unterhalt	Fr./a	149'500	125'000	137'500
Bauteil	Fr./a	15'000	28'500	15'000
Erschliessung/Umgebung	Fr./a	2'500	2'500	2'500
Ausrüstung	Fr./a	90'000	70'000	78'000
Maschinen	Fr./a	42'000	24'000	42'000
Energie	Fr./a	-128'000	-169'000	-105'000
Elektrische Energie	Fr./a	52'000	11'000	75'000
Erdgasersatz	Fr./a	-180'000	-180'000	-180'000
Personal	Fr./a	90'000	90'000	90'000
Sonstiges	Fr./a	577'000	577'500	571'000
Versicherungen	Fr./a	77'000	77'500	71'000
Schlamm Entsorgung	Fr./a	140'000	140'000	140'000
Abgaben Restabwasser	Fr./a	360'000	360'000	360'000
Summe Betriebskosten	Fr./a	1'573'900	1'461'200	1'508'700
SPEZIFISCHE KOSTEN	Fr./m ³	1,05	0,97	1,01
	Fr./kg CSB	0,63	0,58	0,60

Tabelle 14: Vergleich der Bau- und Betriebskosten für verschiedene Verfahren am Beispiel der Kartonfabrik Niedergösgen.

Beispiel Brauerei Feldschlösschen, Rheinfelden

Das Verfahren sowie die wichtigsten technischen Daten dieser Anlage sind ebenfalls weiter oben beschrieben. Diese Anlage wurde unterirdisch erstellt und weist deshalb Investitionskosten auf, die eher höher sind als dies für eine ähnliche Anlage wäre, die auf offener Wiese gebaut werden könnte.

Die Tabelle 15 zeigt einen Vergleich zwischen der Möglichkeit einer aeroben Vorreinigung des Abwassers sowie drei verschiedenen anaeroben Systemen. Aufgrund der Tatsache, dass die Anlage unterirdisch erstellt werden musste, hatten Verfahren mit geringen Bauhöhen bezüglich den Investitionskosten deutliche Vorteile.

Die in Tabelle 15 unter «Energie» dargestellten Kosten verdeutlichen klar, dass die anaeroben Verfahren netto einen Energiegewinn aufweisen, während das aerobe System hohe Energiekosten aufweist.

 Verfahren	Dim.	aerobes Belebtschlammssystem	anaerobes Belebtschlammssystem	anaerober UASB-Reaktor	anaerober Festbettreaktor
Technische Daten					
Abwassermenge	m ³ /d	2'150	2'150	2'150	2'150
	m ³ /a	473'000	473'000	473'000	473'000
CSB-Fracht	kg/d	4'800	4'800	4'800	4'800
	kg/a	1'056'000	1'056'000	1'056'000	1'056'000
INVESTITIONEN	Fr.	4'650'000	9'500'000	8'550'000	9'050'000
Landerwerb	Fr.	200'000	200'000	200'000	200'000
Bauteil	Fr.	1'800'000	2'000'000	2'500'000	2'000'000
Erschliessung/Umgebung	Fr.	250'000	2'500'000	2'500'000	2'500'000
Ausrüstung	Fr.	800'000	4'500'000	3'200'000	4'050'000
Maschinen	Fr.	1'600'000	300'000	150'000	390'000
JAHRESKOSTEN					
Kapitalkosten	Fr./a	609'500	1'023'100	889'200	970'450
Landerwerb	Fr./a	16'000	16'000	16'000	16'000
Bauteil	Fr./a	169'200	188'000	235'000	188'000
Erschliessung/Umgebung	Fr./a	23'500	235'000	235'000	235'000
Ausrüstung	Fr./a	93'600	526'500	374'400	473'850
Maschinen	Fr./a	307'200	57'600	28'800	57'600
Wartung und Unterhalt	Fr./a	132'500	153'000	123'000	144'000
Bauteil	Fr./a	18'000	20'000	25'000	20'000
Erschliessung/Umgebung	Fr./a	2'500	25'000	25'000	25'000
Ausrüstung	Fr./a	16'000	90'000	64'000	81'000
Maschinen	Fr./a	96'000	18'000	9'000	18'000
Energie	Fr./a	148'100	-66'000	-78'000	-63'000
Elektrische Energie	Fr./a	148'100	24'000	11'000	22'000
Erdgasersatz	Fr./a	0	-90'000	-89'000	-85'000
Personal	Fr./a	100'000	130'000	130'000	130'000
Sonstiges	Fr./a	908'900	650'100	650'600	669'600
Versicherungen	Fr./a	46'500	95'000	85'500	90'500
Schlamm Entsorgung	Fr./a	422'400	59'100	59'100	59'100
Abgaben Restabwasser	Fr./a	440'000	496'000	506'000	520'000
Summe Betriebskosten	Fr./a	1'899'000	1'890'200	1'714'800	1'851'050
SPEZIFISCHE KOSTEN	Fr./m ³	4,01	4,00	3,63	3,91
	Fr./kg CSB	1,80	1,79	1,62	1,75

Tabelle 15: Vergleich der Bau- und Betriebskosten für verschiedene Verfahren am Beispiel der Brauerei Feldschlösschen.

Vergärung und Kompostierung fester Abfälle

Bei der Vergärung fester Abfälle sind, im Unterschied zur Kompostierung oder zur Vergärung von Industrieabwässern, nur wenig Daten von Anlagen im Praxismassstab für einen Kostenvergleich vorhanden. Aufgrund dieser Tatsache muss, sowohl bei den Investitions- als auch bei den Betriebskosten, mehrheitlich auf Kostenschätzungen und Offerten abgestützt werden.

Die in diesem Abschnitt in ökonomischer Hinsicht verglichenen Verfahren sind im vorangestellten Kapitel kurz charakterisiert worden. Es wird deshalb hier nicht mehr weiter auf prozessspezifische Einzelheiten eingegangen.

Investitionskosten

Die für die Abschätzung der Investitionen massgebende Grösse ist der **Landbedarf** der entsprechenden Anlage. Für den Landerwerb wurde ein mittlerer Industrielandpreis von 300.– Fr./m² eingesetzt.

Soweit bekannt, wurden die tatsächlichen **Baukosten** eingesetzt. In allen anderen Fällen wurden die Kosten entweder aufgrund von Richtofferten verschiedener (Anlagen-) Anbieter oder auf der Basis eigener Erfahrungen ermittelt. Unter die Position «Erschliessung/Umgebung» gehören im wesentlichen Investitionskosten für: Wasser- und Abwassererschliessung, Elektro-/Telefonerschliessung, Zufahrten und Plätze, Umzäunung mit Tor und Begrünung/Bepflanzung.

Zur Position «**Anlagenteil**» gehören sämtliche prozessspezifischen elektromechanischen Anlagenteile, welche ein bestimmtes Verfahren auszeichnen. Soweit bekannt, wurden auch hier die bei der Realisierung von entsprechenden Anlagen entstandenen Kosten eingesetzt. Wo dies nicht möglich war, wurde auf verschiedene Richtofferten der jeweiligen Anbieter abgestützt.

Unter «**Anlagen und Geräte**» fallen etwa die folgenden, je nach Verfahren/Anlage nicht fest installierten Maschinen und Geräte wie: Greiferkran/Pneulader, Siebmaschine, Pumpen, Kleingeräte und Werkzeuge.

Betriebskosten

Die Ermittlung der Abschreibung und Verzinsung des eingesetzten Kapitals erfolgt nach der in der

Investitionskostenrechnung üblichen Annuitätenmethode. Unter Anwendung eines marktgerechten Zinssatzes von 8,0% und der Nutzungsdauer konnten die Annuitätsfaktoren nach folgender Formel bestimmt werden:

$$[f] = [(1+i)^n \cdot i] : [(1+i)^n - 1],$$

wobei n die Nutzungsdauer in Jahren und i den Zinssatz bezeichnen.

Gegenstand	Zins (%)	Nutzungsdauer (Jahre)	Faktor [f]
Bauteil, Erschliessung + Umgebung	8	25	0,094
Anlagenteil Vergärung	8	16	0,113
Anlagenteil Kompostierung			
– Boxen	8	15	0,117
– Grossmiete	8	12	0,133
Maschinen/Geräte	8	7	0,192

Tabelle 16 : Zins, Nutzungsdauer und zugehörige Annuitätsfaktoren.

Die jährlichen Kosten für **Reparatur, Wartung und Unterhalt** des Bau und Anlageteils wurden durch folgende Sätze, bezogen auf die jeweiligen Investitionskosten, ermittelt:

Gegenstand	Wartungs und Unterhaltssatz (%)
Bauteil, Erschliessung + Umgebung	1
Anlagenteil	
– Kompostierung	3
– Vergärung	3
Maschinen/Geräte	6

Tabelle 17: Wartungs und Unterhaltssätze für Bau, Anlagenteil, Maschinen und Geräte.

In Tabelle 16 wurde für Kompostierung und Vergärung eine **unterschiedliche Nutzungsdauer** angenommen, da bei der Kompostierung – speziell in Hallen – eine sehr aggressive, wasserdampfgesättigte und sauerstoffhaltige Atmosphäre vorherrscht, welche die Korrosion stark begünstigt. Dies trifft bei anaeroben Prozessen, welche zudem in geschlossenen Behältern ablaufen, nicht zu.

Für den Bezug von elektrischer Energie wurde ein Mischpreis von 0,20 Fr./kWh eingesetzt, wobei dieser **Energiepreis** ein Mittelwert zwischen Hoch- und Niedertarif darstellt. Bei der Betriebskostenrechnung der Vergärung wurden für die Energie keine Kosten eingesetzt, weil zur Deckung des Prozessenergiebedarfs keine Fremdenergie notwendig ist. Obwohl die Verfahren zum Teil sehr grosse Mengen an Überschussenergie liefern, wurde für den Verkauf dieser Energie kein Preis eingesetzt. Die spezifischen Betriebskosten reduzieren sich um den Erlös aus den Energieüberschüssen um rund Fr. 15.– bis Fr. 20.– pro Tonne Abfall, je nach Verfahren und aktuellem Energiepreis. Diese Tatsache verbessert zusätzlich die ökonomische Situation der Vergärung, welche unter bestimmten Voraussetzungen im besten Fall voraussichtlich bis zu 40% günstiger ist als die Kompostierung.

Dies gilt insofern auch bei der **Kombination von Vergärung und Kompostierung** als sich bei der kombinierten Variante der Energiebedarf der Grobaufbereitung, der Kompostierung und der Feinaufbereitung aus eigener Erzeugung (durch die Vergärung) decken lässt und auch hier noch elektrische Überschussenergie ins öffentliche Netz abgeben werden kann. Die Gesamtkosten verringern sich in der Folge um den Erlös aus der Abgabe von elektrischer Energie und – sofern ein Verbraucher in der Nähe vorhanden ist – von Wärme. Für die Wärmeabgabe wurde kein Preis eingesetzt, weil je nach Anlagestandort Wärmeenergie nur sehr schlecht oder gar nicht verwertet werden kann.

Pro Arbeitskraft (AK) wurden im Mittel Jahreskosten von Fr. 95 000.– budgetiert. Die **Personalkosten** sind als Bruttobetrag einschliesslich sämtlicher Sozialleistungen zu verstehen.

Die Position «**Versicherungen**» umfasst sämtliche Versicherungen für die Anlage, wobei als Jahresprämie ein Satz von 1% bezogen auf die Investitionskosten eingesetzt wurde. «**Verwaltung**»

umfasst die jährlichen Aufwendungen im administrativen Bereich wie Büromaterial, Telefongebühren, etc. Zudem fallen jährlich Kosten für die Kontrolle der **Produktqualität** (Analytik, Beratung) an. In Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad der angelieferten Abfälle und von der gewählten Verfahrenstechnik fallen ca. 1 bis 4% Störstoffe an, welche **Entsorgungskosten** verursachen. Die dabei anfallenden Kosten sind in dieser Position zusammengefasst.

Die Tabellen 18 und 19 zeigen Bau- und Betriebskosten von Anlagen zur Vergärung bzw. Kompostierung biogener Abfälle. Die Daten beruhen auf Publikationen, Richtofferten sowie eigenen Berechnungen aus den Jahren 1991. Einzelne Daten insbesondere der Verfahren BTA und DRANCO sind etwas älter. Alle Verfahren wurden auf einen vergleichbaren Stand gebracht, d.h. sie umfassen denselben Lieferumfang. Es ist selbstverständlich möglich, dass je nach lokalen Voraussetzungen im speziellen Fall sich die Kosten zugunsten des einen oder anderen Verfahrens verschieben können. Es kann jedoch in jedem Fall festgehalten werden, dass die **Vergärung** auch ohne Einberechnung des Energieerlöses **deutlich kostengünstiger** ist, als die Kompostierung.

 Verfahren	VALORGA einstufig mesophil	BTA zweistufig mesophil	DRANCO einstufig thermophil	KOMPOGAS einstufig thermophil	KOMPOGAS einstufig thermophil
Durchsatz (t/a)	10'000	10'000	10'000	10'000	5'000
INVESTITIONEN	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.
Landerwerb	510'000	480'000	420'000	300'000	180'000
Bauteil	1'700'000	1'900'000	1'582'000	1'556'000	1'166'000
Erschliessung / Umgebung	250'000	250'000	250'000	250'000	150'000
Anlageteil inkl. folgende Positionen: Aufgabereinheit / Zerkleinerung Fermenter Befüllen, Entleeren, Entwässern Gasspeicher Mess- und Regeltechnik Gasverwertung (WKK) Abluftbehandlung Elektrotechn. Installation Installation	10'000'000	8'000'000	6'100'000	5'100'000	3'600'000
Waage	100'000	100'000	100'000	100'000	100'000
Greiferkran / Pneulader	160'000	160'000	160'000	*	*
Sieb	100'000	100'000	100'000	60'000	60'000
Gesamtinvestitionen	12'820'000	10'990'000	8'172'000	7'366'000	5'256'000
BETRIEBSSKOSTEN	Fr./an	Fr./an	Fr./an	Fr./an	Fr./an
Kapitalkosten					
Landerwerb	40'800	38'400	33'600	24'000	14'400
Bauteil	169'200	188'000	158'108	155'664	119'004
Erschliessung / Umgebung	23'500	23'500	23'500	23'500	14'100
Anlageteil	1'130'000	904'000	689'300	576'300	406'800
Maschinen / Geräte	49'920	49'920	49'920	11'520	11'520
Wartung und Unterhalt					
Bauteil	18'000	20'000	16'820	16'560	12'660
Erschliessung / Umgebung	2'500	2'500	2'500	2'500	1'500
Anlageteil	300'000	240'000	183'000	153'000	108'000
Maschinen / Geräte	15'600	15'600	15'600	3'600	3'600
Energie	0	0	0	0	0
Personal	190'000	190'000	190'000	190'000	95'000
Sonstiges					
Versicherung	128'200	109'900	87'120	73'660	52'560
Verwaltung	40'000	40'000	40'000	40'000	25'000
Qualitätsüberwachung	20'000	20'000	20'000	20'000	10'000
Entsorgung Reststoffe	100'000	100'000	100'000	100'000	50'000
Summe Betriebskosten	2'227'720	1'941'820	1'609'468	1'390'304	924'144
SPEZIFISCHE KOSTEN	Fr./t	Fr./t	Fr./t	Fr./t	Fr./t
inkl. Landerwerb	223	194	161	139	185
ohne Landerwerb	219	190	158	137	182

* In der Position «Anlageteil» enthalten.

Tabelle 18: Vergleich der Investitions- und Betriebskosten der Vergärung fester biogener Abfälle.

 Verfahren	OFFENE MIETEN überdacht Umsetzer	BOXEN geschlossen vollautomatisch Biofilter	GROSSMIETE geschlossen vollautomatisch Biofilter
Durchsatz (t/a)	3'000	3'000	10'000
INVESTITIONEN	Fr.	Fr.	Fr.
Landerwerb	1'110'000	900'000	1'800'000
Hallen, Ueberdachung (Grob-/Feinlinie, Lager)	112'000	120'000	600'000
Rottehalle, Ueberdachung Rotteplatz	275'000	*	1'900'000
Belüftung / Entlüftung		*	700'000
Büro-Container, Inneausbau	30'000	30'000	100'000
Platzfestigung (HMT)	370'000	300'000	300'000
Abwassersammelbecken	70'000	30'000	
Erschliessung, Umgebung	200'000	200'000	350'000
Mühle	300'000	300'000	*
Anlageteil, Umsetzmaschine	270'000	1'836'000	3'800'000
Waage	100'000	100'000	100'000
Pneulader	120'000	120'000	160'000
Sieb	60'000	60'000	*
Engineering, Bauleitung	224'510	379'080	1'020'500
Gesamtinvestitionen	3'241'510	4'375'080	10'830'500
BETRIEBSSKOSTEN	Fr./an	Fr./an	Fr./an
Kapitalkosten			
Landerwerb	88'800	72'000	144'000
Bauteil	111'062	90'154	443'727
Erschliessung / Umgebung	18'800	18'800	32'900
Anlageteil		214'812	505'400
Maschinen / Geräte	144'000	92'160	30'720
Wartung und Unterhalt			
Bauteil	9'570	5'800	37'000
Erschliessung / Umgebung	2'000	2'000	3'500
Anlageteil		55'080	114'000
Maschinen / Geräte	45'000	28'800	9'600
Energie			
Elektrische Energie	1'000	16'000	90'000
Treibstoffe	11'000	6'000	16'000
Personal	95'000	62'700	285'000
Sonstiges			
Versicherung	32'415	43'751	108'305
Verwaltung	25'000	25'000	40'000
Qualitätsüberwachung	10'000	10'000	20'000
Entsorgung Reststoffe	7'500	7'500	100'000
Summe Betriebskosten	601'147	750'556	1'980'152
SPEZIFISCHE KOSTEN	Fr./t	Fr./t	Fr./t
inkl. Landerwerb	200	250	198
ohne Landerwerb	171	226	184

* In der Position «Anlageteil» enthalten.

Tabelle 19: Vergleich der Investitions- und Betriebskosten der Kompostierung fester biogener Abfälle.

Vier verschiedene Gärverfahren werden in der Tabelle 19 verglichen:

- | | | |
|----|----------|-------------------------|
| 1. | VALORGA | (mesophil, einstufig) |
| 2. | BTA | (mesophil, zweistufig) |
| 3. | DRANCO | (thermophil, einstufig) |
| 4. | KOMPOGAS | (thermophil, einstufig) |

Die Kosten wurden ermittelt für eine Kapazität von 10 000 t/a. Für das Verfahren KOMPOGAS, bei welchem auch kleine Einheiten angeboten werden, sind zusätzlich die Kosten für die Behandlung von 5000 t/a dargestellt. Eingerechnet wurden in allen Verfahren die Kosten für eine (unter gewissen Umständen notwendige) aerobe Nachbehandlung (Nachkompostierung) von 2 Wochen. Bei den dargestellten Kosten handelt es sich um die gesamten Kosten, welche beim Bau und Betrieb unter bestimmten Randbedingungen anfallen. Die spezifischen Kosten der Vergärung sind signifikant tiefer als diejenigen der Kompostierung, da der Landbedarf von Gäranlagen wesentlich geringer ist als derjenige von Kompostierungsanlagen.

Drei verschiedene Kompostierverfahren werden in Tabelle 19 verglichen:

1. Die offene Mietenkompostierung zur Verwertung von 3000 t/a, welche ihre Anwendung findet in kleineren Anlagen mit grösserer Entfernung zu bewohnten Gebieten und/oder in Kombination mit der anaeroben Vergärung, da in diesem Fall die Kompostierung weniger Geruchsprobleme bringt.
2. Die vollständig geschlossene, teilautomatisierte Boxenkompostierung mit Be- und Entlüftung, zur Verwertung von 3000 t/a, welche durch die Möglichkeit der Abluftbehandlung mittels eines Biofilters näher an bewohnten Gebieten oder in Industriezonen gebaut werden kann.
3. Die vollständig geschlossene, weitgehend automatisierte Grossmieten-Kompostierung mit Be- und Entlüftung für die Verwertung von 10 000 t/a. Durch die Möglichkeit der Desodorierung der geruchsbelasteten Abluft mittels Biofilter können derartige Anlagen, falls keine anderen Einschränkungen vorliegen, nahe an bewohnten Gebieten oder in Industriezonen erstellt werden. Für dieses Verfahren existieren zwei technische Lösungen, welche sich in den Kosten nicht sehr stark unterscheiden. Es

sind dies die im Kapitel über die Behandlung fester Abfälle beschriebenen Verfahren Kanalrotte und Wandertafelmiete.

Die dargestellten Kosten umfassen sämtliche Aufwendungen, die bei der Erstellung und beim Betrieb anfallen. Aus Tabelle 19 geht hervor, dass die spezifischen Kosten der Kompostierung im Bereich von Fr. 200.– pro Tonne behandelter Abfälle liegen. Die offene Mietenkompostierung ist nicht signifikant billiger als die geschlossenen, automatisierten Lösungen, weil sie relativ platz- und personalintensiv ist, was bei kleinem Durchsatz hohe Betriebskosten ergibt.

Für **kombinierte Anlagen zur Vergärung und Kompostierung** werden die Investitionskosten deutlich tiefer sein als die Summe der Kosten zweier einzelner Anlagen, weil verschiedene Teile der Grob- und Feinlinie wie Sortierstrecke, Zerkleinerung, Sieb, Radlader etc. nur einmal angeschafft werden müssen. Einsparungen sind ebenfalls möglich bei den Positionen Erschliessung, Umgebung und Bauteil. Kombinierte Anlagen verursachen niedrigere spezifische Kosten als die alleinige Kompostierung, welche bei Behandlung von nassen Küchenabfällen kaum offen betrieben werden kann.

Anhang

Literaturempfehlungen

☞ arbi/probag (1991): Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege, Schriftenreihe des Bundesamts für Energiewirtschaft # 47, 108 Seiten; zu bestellen bei: BEW, M.Roux, 3003 Bern (gratis).

Diese leicht verständliche Studie gibt verschiedene zusätzliche Informationen zu in dieser Broschüre behandelten Themen bzgl. der Vergärung fester biogener Abfälle und auch Angaben zur Qualität des vergorenen Substrats als Bodenverbesserer. Ein Literaturverzeichnis mit 75 Literaturstellen hilft demjenigen weiter, der sich in einzelne Fragen vertiefen möchte.

☞ probag/arbi (1991): Stand und Entwicklung der Kompostierung in der Schweiz, Schriftenreihe des BUWAL # 151, BUWAL, Bern, 50 Seiten.

Diese Studie gibt viele Daten über die bestehenden schweizerischen Kompostwerke (Betriebsbedingungen, Platzbedarf, Qualität etc.) sowie über die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten des Kompostmarketings. Eine aktualisierte Neuauflage ist für Ende 1993 geplant.

☞ ANS (1989) [Hrsg.]: Vergärung fester organischer Abfälle - Möglichkeiten und Grenzen der Biogasgewinnung, Schriftenreihe des ANS, # 16, ANS-Schweiz, c/o probag, Dietikon (250 Seiten, 19 Beiträge)

Dieses Büchlein enthält neben Grundlagen verschiedene Beiträge von den Herstellern von Anlagen zur Vergärung fester Abfälle mit detaillierten Angaben zu ihren Prozessen und realisierten Anlagen.

☞ Wellinger A., Baserga U., Edelman W., Egger K., Seiler B. (1992, überarbeitete Neuauflage): Biogas-Handbuch: Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen, Verlag Wirz Aarau, (im Buchhandel: ISBN 3-85983-035-X), 180 Seiten.

Obwohl der Schwerpunkt auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen liegt, werden sehr viele auch allgemein brauchbare Informationen, Daten und Tabellen präsentiert, wie beispielsweise Angaben zur Materialwahl, Heizung, Gasspeicherung und -verwertung, Sicherheitsaspekte, etc.

☞ Uni Stuttgart (1992): Kalte Verfahren der Abfallbehandlung, Müllvergärung und Biomüllkompostierung, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft # 51, Erich Schmidt Verlag, ISBN 3-503-02969 (175 Seiten).

Beiträge zur Vergärung und Kompostierung fester Abfälle, insbesondere auch zur separaten Einsammlung der Abfälle, hygienischen Aspekten, Fragen des Umweltschutzes und zu Stoffbilanzen. Vorstellen einer Grossanlage zur Kompostierung.

☞ Thomé-Kozmiensky K. (1989) [Hrsg.]: Biogas - Anaerobtechnik in der Abfallwirtschaft, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin (358 Seiten), ISBN 3-924511-33-0.

Sehr vielseitiges Buch, welches auch die Vergärung von flüssigen Abfällen sowie Abtrennung organischer Stoffe, Entsorgungskonzepte und Gasaufbereitung/-verwertung behandelt (25 Vorträge).

☞ Palz W. (1985) [Hrsg.]: Energieforschung bei der EG: Biogasanlagen in Europa - ein Handbuch für die Praxis, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln (350 Seiten), ISBN 3-88585-265-9.

Umfangreiches, wenn auch in gewissen Bereichen nicht mehr ganz aktuelles Buch mit sehr vielen Detailangaben zu Praxisanlagen, Angaben zu gesetzlichen Bestimmungen in der EG und USA sowie zu Massnahmen zur Einführung der Anaerobtechnik.

Adressen der Autoren

Dr. Werner Edelmann
Arbeitsgemeinschaft Bioenergie «arbi»
8933 Maschwanden

Hans Engeli
probag AG
Grünastr. 23
8953 Dietikon

Dr. Michel Glauser
Biol-Conseils SA
Rue de la Serre 5
2000 Neuchâtel

Helmut Hofer
HTH-Verfahrenstechnik
Feldeggstr. 1
8406 Winterthur

Yves Membrez
EREP SA
Chemin du Coteau 28
1123 Aclens

M^e Jacques-H. Meylan
Av. du Tribunal-Fédéral 1
1002 Lausanne

Dr. Jean Paul Schwitzguébel
EPFL, Génie Biologique
1015 Lausanne

Verzeichnis der Tabellen und Figuren

	Seite
Tabelle 1 : Ergebnisse einer Sortierung der organischen Hausmüllfraktion in Genf.	25
Tabelle 2 : Anfall an organischen Reststoffen in verschiedenen Industriebereichen.	26
Tabelle 3 : Ungefähre Zusammensetzung des schweizerischen Haushaltabfalls 1990 (Frischgut).	28
Tabelle 4 : Das Potential an biogenen, festen Abfällen in der schweizerischen Industrie.	28
Tabelle 5 : Schätzung des Potentials der festen biogenen Abfälle in der Schweiz, welche gär- und/oder kompostierbar sind (excl. Klärschlamm und Landwirtschaft).	31
Tabelle 6 : Schätzung der Abwässermengen von verschiedenen Industriezweigen.	31
Tabelle 7 : Anlagen zur Vergärung fester biogener Abfälle.	32
Tabelle 8 : Schweizerische Anlagen zur Vergärung von Industrieabwässern.	33
Tabelle 9 : Die potentiellen Gaserträge verschiedener biogener Industrieabfälle.	34
Tabelle 10 : Technische Daten der Anlage Kartonfabrik Niedergösgen.	39
Tabelle 11 : Technische Daten der Anlage Feldschlösschen, Rheinfelden.	41
Tabelle 12 : Zins, Nutzungsdauer und zugehörige Annuitätsfaktoren.	55
Tabelle 13 : RWU-Sätze für Bau und Anlageteil.	55
Tabelle 14 : Vergleich der Bau- und Betriebskosten für verschiedene Verfahren am Beispiel der Kartonfabrik Niedergösgen.	56
Tabelle 15 : Vergleich der Bau- und Betriebskosten für verschiedene Verfahren am Beispiel der Brauerei Feldschlösschen.	57
Tabelle 16 : Zins, Nutzungsdauer und zugehörige Annuitätsfaktoren.	58
Tabelle 17 : Wartungs und Unterhaltssätze für Bau, Anlageteil, Maschinen und Geräte.	58
Tabelle 18 : Vergleich der Investitions- und Betriebskosten der Vergärung fester biogener Abfälle.	60
Tabelle 19 : Vergleich der Investitions- und Betriebskosten der Kompostierung fester biogener Abfälle.	61
Figur 1 : Konventioneller Rührkessel.	18
Figur 2 : Kontaktprozess.	19
Figur 3 : Schlammbedreaktor («UASB»).	19
Figur 4 : Anaerobfilter im up-flow-Betrieb.	20
Figur 5 : Zweistufenprozess.	21
Figur 6 : Beispiele von Kohlenstoffbilanzen bei Belüftung und bei Vergärung eines Abwassers.	23
Figur 7 : Zusammensetzung des Haushalt-Kehrichts (Mittelwerte verschiedener Gemeinden des schweizerischen Mittellandes, probag/arbi 1990).	27
Figur 8 : Fliessbild der Anlage Kartonfabrik Niedergösgen.	39
Figur 9 : Fliessbild der Anlage Feldschlösschen, Rheinfelden.	41
Figur 10 : Fliessbild der Anlage Zuckerfabrik Aarberg.	42
Figur 11 : Fliessbild des Einstufenprozesses.	44
Figur 12 : Fliessbild des Zweistufenprozesses.	45
Figur 13 : Fliessbild der Kombination von Vergärung mit Kompostierung.	51

Trägerorganisationen

VSA

**Verband Schweizerischer
Abwasserfachleute**

Sia

**Schweizerischer Ingenieur- und
Architekten-Verein**



**Schweizerischer
Technischer Verband**

ANS

**Verband zur Verwertung
organischer Abfälle**